

Grado Ingeniería Mecánica
(2017-2018)

Trabajo Fin de Grado

“Estudio y análisis del sistema de airbags para el empaquetamiento de una bombilla”

Pablo Gutiérrez-Solana Díez

Tutor

Ramón Eulalio Zaera Polo

Madrid a 21 de Septiembre de 2018



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo consiste en el desarrollo de un medio de protección para una bombilla a través de un sistema de airbags que cumplirán la función amortiguadora frente al impacto. Para el desarrollo de este medio de amortiguación se han diseñado diferentes modelos para la forma de los airbags y se han sometido a un impacto contra una superficie lisa. Para el diseño y análisis de los modelos se ha empleado la herramienta de software Abaqus, especializado en análisis por el Método de los Elementos Finitos (MEF). El programa Abaqus bajo el modo Explicit es capaz de simular el impacto de un modelo contra una superficie obteniendo medidas de aceleración, tensiones máximas y energía disipada en el momento de la colisión. El comportamiento de los modelos de amortiguamiento depende de las aceleraciones soportadas por la bombilla en el instante de tiempo que dura la colisión. Una vez probados todos los modelos se ha procedido a optimizarlos mediante cambios de parámetros y condiciones de contorno. Además, se presenta un conjunto de incidencias surgidas durante el desarrollo de este trabajo que han servido para profundizar en el manejo de la herramienta de software utilizada.

ABSTRACT

The main objective of this work consist in the development of a means of protection for a light bulb through a system of airbags that will impact buffer function. Different models for the shape of the airbags are designed for the development of this means of cushioning and they have had an impact against a flat surface. For the design and analysis of models has been used software tool Abaqus, specialized in analysis by the finite element method (FEM). The Abaqus program under the Explicit mode is capable of simulating the impact of a model against a surface obtaining measures acceleration, maximum stresses and energy dissipated at the time of the collision. The behavior of models of quenching depends on accelerations supported by the bulb at the moment of time that last the collision. Once tested all models has been to optimize by changing parameters and boundary conditions. It also presents a set of incidents arising during the development of this work that have served to deepen in the management of the used software tool.

ÍNDICE GENERAL

1	MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1	Motivación	9
1.2	Objetivos	11
2	ANTECEDENTES.....	12
2.1	Historia del packaging.....	12
2.2	Historia del airbag	14
2.3	Últimas evoluciones del airbag	17
2.4	Mars Pathfinder	18
2.4.1	Secuencia de aterrizaje	19
2.4.2	Diseño del sistema.....	20
2.5	Otros antecedentes.....	20
2.6	Diversos sistemas de relleno y acolchado empleados en la actualidad	22
2.6.1	Plástico Burbuja	22
2.6.2	Film de Espuma.....	23
2.6.3	Perfiles de Espuma	23
2.6.4	Chips de Relleno	24
2.6.5	Sistema de Relleno Bolsas de Aire.....	24
2.6.6	Sistema de Relleno de Papel	25
2.6.7	Espuma Expandible.....	26
2.6.8	Cartón Nido de Abeja.....	26
2.6.9	Tecnología pack&strat	27
2.7	La utilidad del aire comprimido	28
2.8	Entorno socioeconómico del packaging.....	30
3	METODOLOGÍA	32
3.1	Orígenes de la metodología por elementos finitos	32
3.2	Introducción al MEF	33
3.2.1	Funciones de interpolación.....	34
3.3	La eficacia de un análisis de elementos finitos para el diseño de un embalaje	34

3.4	El módulo Explicit	35
3.5	Interés por la aceleración como variable de análisis	37
3.6	Diferentes configuraciones de posición de caída	38
3.7	Análisis de sensibilidad de la malla	39
4	DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	41
4.1	Bombilla.....	42
4.2	Los Airbags	46
4.3	Fluid Cavity.....	47
4.4	Materiales.....	49
4.5	Mallado	50
4.6	Uniones	53
4.7	Model Attributes	54
4.8	Suelo y Contacto	55
4.9	Velocidad	61
4.10	Steps	62
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
5.1	Primera tipología considerada.....	68
5.1.1	Modelado con 0,1mm de espesor de membrana	68
5.1.2	Simulación.....	69
5.2	Segunda tipología considerada.....	73
5.2.1	Modelado con 0,1mm de espesor de membrana	74
5.2.2	Simulación.....	74
5.3	Tercera tipología considerada	79
5.3.1	Modelado con 0,1mm de espesor de membrana	79
5.3.2	Simulación.....	79
5.4	Cuarta tipología considerada.....	84
5.4.1	Modelado con 1mm de espesor de membrana	84
5.4.2	Simulación.....	85
5.5	Quinta tipología considerada.....	89
5.5.1	Modelado con 1mm de espesor de membrana	89

5.5.2	Simulación.....	89
6	ANÁLISIS PRESUPUESTARIO	94
7	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	97
8	REFERENCIAS	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Hoja de Banano para conservar alimentos	12
Ilustración 2. Airbag del sector automovilístico	16
Ilustración 3. Chaqueta de motociclismo con sistema de airbags	17
Ilustración 4. Diseño de sistema de airbags para misión Pathfinder	19
Ilustración 5. Sistema airbags para experimento de caída.....	21
Ilustración 6. . Strat pack para filo fresadora	27
Ilustración 7. Esquema funcionamiento Aire comprimido a presión constante	29
Ilustración 8. Gráfica de sensibilidad de malla	40
Ilustración 9. Bombilla de referencia para modelizar	42
Ilustración 10. Part bombilla	43
Ilustración 11. Protusión por revolución	43
Ilustración 12. Acotado perfil bombilla	44
Ilustración 13. Densidad vidrio Ilustración 14. Propiedades elásticas bombilla	44
Ilustración 15. . Diseño de la bombilla Led	45
Ilustración 16. Sección exterior bombilla.....	45
Ilustración 17. Asignado material a sección exterior	45
Ilustración 18. Asignado sección a part bombilla	46
Ilustración 19. Cara interna de los airbags	47
Ilustración 20. propiedades del gas interno de los airbags	48
Ilustración 21. Geometría del airbag	51
Ilustración 22. Elección de forma de los elementos MEF.....	51
Ilustración 23. Tipo de elementos para airbags.....	52
Ilustración 24. Elección para el tamaño de malla.....	52
Ilustración 25. Airbag mallado.....	53
Ilustración 26. Unión rígida entre bombilla y airbag	54
Ilustración 27. Propiedades de aire exterior	55
Ilustración 28. Sección superficie de impacto.....	56
Ilustración 29. Condiciones de contorno para superficie de impacto.....	56
Ilustración 30. Localización condiciones de contorno	57
Ilustración 31. Restricción de movimientos en superficie de impacto	57
Ilustración 32. Elección cara de superficie de impacto	58
Ilustración 33. Comportamiento en dirección normal de la superficie suelo	59
Ilustración 34. Comportamiento tangencial de la superficie suelo.....	59
Ilustración 35. Elección de pareja de superficies y propiedades de contacto.....	60
Ilustración 36. Asignación de velocidad Ilustración 37. Módulo y dirección de velocidad..	62

Ilustración 38. Tiempo mínimo de simulación para impacto	63
Ilustración 39. Tiempo de simulación	66
Ilustración 40. Frecuencia de resultados	66
Ilustración 41. Elección de variables para representar frente al tiempo.....	67
Ilustración 42. Diseño del primer modelo	68
Ilustración 43. Después de 0,0157 segundos del lanzamiento	69
Ilustración 44. Después de 0,0175 segundos del lanzamiento	70
Ilustración 45. Después de 0,021 segundos del lanzamiento	70
Ilustración 46. Diseño del segundo modelo	73
Ilustración 47. Después de 0,014 segundos del lanzamiento	74
Ilustración 48. Después de 0,016 segundos del lanzamiento	75
Ilustración 49. Después de 0,02 segundos del lanzamiento	75
Ilustración 50. Después de 0,032 segundos del lanzamiento	76
Ilustración 51. Deformación máxima del segundo modelo.....	78
Ilustración 52. Tercera tipología considerada	79
Ilustración 53. Después de 0.0125 segundos del lanzamiento	80
Ilustración 54. Después de 0.015 segundos del lanzamiento	80
Ilustración 55. Después de 0.02 segundos del lanzamiento	81
Ilustración 56. Después de 0.025 segundos del lanzamiento	81
Ilustración 57. Diseño del tercer modelo.....	84
Ilustración 58. Después de 0,008 segundos del lanzamiento	85
Ilustración 59. Después de 0,012 segundos del lanzamiento	86
Ilustración 60. Después de 0,018 segundos del lanzamiento	86
Ilustración 61. Quinta tipología considerada.....	89
Ilustración 62. Después de 0,0225 segundos del lanzamiento	90
Ilustración 63. Después de 0,025 segundos del lanzamiento	90
Ilustración 64. Después de 0,0275 segundos del lanzamiento	91
Ilustración 65. Después de 0,03 segundos del lanzamiento	91

1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

El aumento de población y de la industrialización agrava el deterioro del medioambiente ecológico. Una manera de aliviar el deterioro del medioambiente es cambiando los patrones de consumo individuales. Entre el 30% y 40% del deterioro ambiental ecológico proviene del consumo del hogar y personal. A veces los consumidores se enfrentan a opciones relativas al entorno ecológico en su día a día, tales como si llevar a la compra su propia bolsa ecológica o utilizar bolsas de plástico proporcionadas por el supermercado, utilizar bombillas de led que ahorran energía o bombillas incandescentes en casa, reciclar la basura y separarla por contenedores o deshacerse de la basura sin ningún tipo de cuidado, o elegir entre usar una mochila ecológica o una convencional para un viaje a la vista. Aparte de sus propios patrones de consumo, los consumidores pueden también afectar al consumo ecológico de otra gente, incrementando su preocupación por cuestiones medioambientales, el deseo de productos ecológicos, la ayuda a organizaciones respetuosas con el medio ambiente y el boicot a compañías que no respeten el medioambiente. Además, las preferencias de consumo ecológico de los consumidores pueden motivar a las empresas a participar en actividades para mejorar el medioambiente, considerar el medioambiente en el proceso de marketing y desarrollo de sus productos e invertir más en protección medioambiental.

La demanda de tecnologías innovadoras para el embalaje como el embalaje activo ha crecido muy rápidamente en estos últimos años debido a los requisitos del mercado de la alimentación en aspectos como el aumento de la conservación de los alimentos, mejora de la calidad de productos de envasado, seguridad de los embalajes y reducción de desperdicios. El embalaje activo puede ser definido como la tecnología del embalaje donde ciertos aditivos, se añaden al material de embalaje o introducidos dentro del contenedor del embalaje para interactuar directamente con el producto o con su entorno para mejorar su calidad y seguridad. Métodos comunes para añadir elementos activos en un embalaje pueden ser; situarlo en lugar visible con bolsitas de aire o con una almohadilla o utilizando un proceso que oculte el elemento activo como la adición directa en una matriz polimérica para el revestimiento del embalaje. Debido a su simplicidad, las bolsitas de aire y las almohadillas se han mantenido valorados como mecanismo de protección en investigación y en la práctica comercial. En este contexto, las bolsitas de aire y las almohadillas sirven para el mismo

propósito, mantener el elemento activo mientras que una superficie porosa permite al elemento interactuar con el contenido del embalaje. Para distinguir entre ellas, las bolsitas suelen ser más pequeñas que las almohadillas. La aplicación de herramientas de software de análisis de elementos finitos ha tenido mucho éxito en varias operaciones de procesado de comida tales como el deshidratado, el calentamiento, el descongelado, el congelado, el enfriado y daños mecánicos. La producción agrícola es muy susceptible al deterioro del producto durante la cosecha, la recolecta, el empacado y el transporte; el cual puede resultar en una reducción sustancial de la calidad. De acuerdo con (Bollen, 1999),

El deterioro mecánico en la producción agrícola, especialmente la fruta, se manifiesta en forma de manchas. La percepción de la mayoría de los consumidores es que la calidad de la fruta depende de la apariencia que esta tenga y un pequeño roce o golpe puede afectar a la decisión final del cliente a la hora de comprar el producto. Es importante tener un conocimiento adecuado de las características mecánicas del producto para diseñar y desarrollar máquinas agrícolas y para limitar la dependencia de experimentos que son ineficaces por su costo y por su larga duración. Las herramientas de análisis de elementos finitos han demostrado su eficacia en el estudio del comportamiento de productos agrícolas expuestos a diversas cargas mecánicas. Algunos investigadores han utilizado estas herramientas para simular la caída de diferentes frutas para estimar la deformación de éstas considerando las frutas como si fueran esferas y proporcionando a éstas las propiedades de un único material. (Tobi Fadiji, 2018)

¿Pero qué pasa cuando los clientes se encuentran el producto que están buscando con un impacto o hundimiento en el envase? En ese momento el cliente puede pensar principalmente dos cosas: una, que el contenido está con algún tipo de defecto y preferiblemente escoja el mismo producto, pero sin el daño o dos: que el contenido no ha sufrido daño (es decir, que sigue siendo útil su contenido) y puede o no elegirlo para su consumo. Es por ello que dentro de la cadena de suministro y más especialmente los departamentos de logística y distribución se preocupen por que los productos lleguen en perfectas condiciones hasta el consumidor. De esta manera se evitan tener que asumir gastos extraordinarios por devolución de producto. Actualmente, los sistemas de transporte de mercancías están experimentando una revolución gracias a las bolsas inflables utilizadas para mantener la carga inmovilizada y protegida en el caso de sucesos adversos como vibraciones, colisiones o movimientos bruscos.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en el desarrollo de un medio de protección para una bombilla a través de un sistema de airbags que harán la función de amortiguador frente a impactos. Para el desarrollo de este medio de amortiguación se han diseñado diferentes modelos para la forma de los airbags para analizar el comportamiento que cada uno tiene frente al impacto contra una superficie lisa. Para el diseño y análisis de los modelos se ha empleado la herramienta de software Abaqus, especializado en análisis por el Método de los Elementos Finitos (MEF). El programa Abaqus bajo el modo Explicit es capaz de simular el impacto de un modelo contra una superficie obteniendo entre muchas otras, medidas de aceleración, tensiones máximas y energía disipada en el momento de la colisión. Con los resultados obtenidos de cada simulación se hará un análisis y se propondrán ideas que ayuden a optimizar el comportamiento de los modelos en la situación descrita anteriormente. Las propuestas que se utilicen para la optimización de los modelos estarán relacionadas con variables físicas susceptibles de ser modificadas como en cualquier proceso experimental. Otros objetivos que se pretenden lograr durante la realización de este proyecto son; profundizar en el funcionamiento y posibilidades de la herramienta de simulación, la búsqueda de futuras aplicaciones para los sistemas de protección mediante airbags y comprender los fenómenos físicos involucrados en el efecto amortiguador del aire a presión confinado en membranas de polietileno.

2 ANTECEDENTES

2.1 Historia del packaging

La gran mayoría de expertos definen el término anglosajón “packaging” como: la ciencia, el arte y la tecnología de inclusión o protección de productos para la distribución, la venta y su uso.

Los historiadores coinciden en la necesidad de los cazadores nómadas en conservar y proteger sus bienes más preciados. Cuando el hombre empezó a asentarse en aldeas y núcleos sociales, se dio cuenta de la necesidad de almacenamiento y transporte para abastecer a grandes grupos de personas. En esa época el hombre utilizaba piel de animal, hojas grandes, piezas de madera ahuecada para almacenar y conservar alimentos que se consumirían en los días posteriores.

Los avances sucedidos en la edad antigua y en la edad media cambiaron el mundo del envasado apareciendo una gran variedad de materiales útiles para almacenar, proteger, transportar mercancías y productos. Gracias a estos avances el ser humano podía almacenar los cultivos y alimentos para el invierno, podía proteger los productos y alimentos de animales peligrosos y podía transportarlos entre diferentes poblaciones. Los materiales utilizados durante estas edades variaban dependiendo del paisaje geográfico de cada pueblo y los más comunes eran: sacos y cestas tejidas con plantas, cajas de madera, vasijas de barro y arcilla, recipientes de vidrio soplado y barriles de madera.



Ilustración 1. Hoja de Banano para conservar alimentos

En la edad Moderna muchos de los avances y nuevas tecnologías que surgieron provenían de otras culturas. La invención y la fabricación de papel resultó ser un avance de los más utilizados como

material de envase re-moldeable durante la esta época. Durante la revolución industrial el cambio en el nivel de producción y el aumento en las rentas disponibles animó a los productores a desarrollar nuevos métodos de embalaje duraderos, fiables y eficientes. En esta época surgieron grandes inventos que transformaron el modo de estudiar y desarrollar los envases.

En 1796, Alois Senefelder inventó la litografía en Múnich, permitiendo la impresión de ilustraciones en blanco y negro en las etiquetas impresas para las botellas de vidrio, cajas de metal y las primeras cajas de cartón. La cromolitografía fue inventada en 1837 y se hizo popular cuando los fabricantes de etiquetas de envasado se dieron cuenta de su potencial. En 1817, Thomas Gilpin, invento la primera máquina cilíndrica de fabricación de papel utilizada para hacer cartones dando origen a los envases flexibles. Entre 1860 y 1890 se produce un florecimiento del comercio y los envases de doble uso se hacen populares como por ejemplo para los productos de tabaco que utilizaba un estuche de estaño con dos asas y un buen patrón de diseño litografiado para ser reutilizado como cesta de picnic. Otras innovaciones de esta época fueron:

Tres referentes de modelo de packaging entre 1860 y 1890 son: Avena Quaker como primer producto envasado de manera moderna, por su habilidad en la distribución del producto, añadiéndole información detallada y personalidad al envase. Jabón Sunlight, cuyo envase estaba dotado de una personalidad innovadora y amigable cuya consecuencia fue destacar entre sus competidores. Thompson y Norris, presentaron por primera vez unas cajas fabricadas con cartón corrugado de doble capa cuya principal función era evitar que el material se estirase durante el transporte. Estas cajas han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la distribución durante el siglo XX.

En 1904 la Litografía Offset fue descubierta por un operario ruso llamado Ira Rubel mientras trabajaba en una imprenta de Nueva Jersey. Rubel, sin querer, dejó sin marcar un pliego y la impresión pasó al cartucho que cubría el cilindro. En el siguiente pliego la impresión quedó por las dos caras así Rubel detectó que cuando la plancha imprimía sobre una superficie de caucho y un papel entraba en contacto con el caucho, la imagen impresa a través del caucho resultaba de mejor calidad. Esto supuso el nacimiento de la impresión Offset, también denominada impresión indirecta, por haber en ésta un paso intermedio. En 1911 Hesser inventa en Suiza la primera máquina de packaging totalmente automática para envasar café. En 1920 se inventa una nueva tecnología de impresión llamada flexografía cuyos resultados son más realistas que la litografía e incluso permite

la posibilidad de imprimir sobre todo tipo de superficies incluyendo: cartón ondulado, cartones de leche, bolsas de papel, cajas de cartón plegables y películas metálicas.

Tras la Primera Guerra Mundial se introdujeron los plásticos como nuevo material en la industria del embalaje y cuyos resultados fueron muy satisfactorios. El plástico proveniente de la celulosa transformó la industria del embalaje y dominó el sector de envases flexibles durante años. El polietileno surgió en los años 60 y rápido se convirtió en el material de envasado preferido. Previamente a la Segunda Guerra Mundial hubo grandes innovaciones para los productos sintéticos como el vinilo, el etileno y el acrílico cuyo desarrollo desembocó en el descubrimiento del PVC, el nylon, el teflón, el poliestireno y el polietileno. A su vez estos descubrimientos transformaron la industria del embalaje y predijeron el auge que en el futuro iba a tener los materiales plásticos.

Tras la Segunda Guerra Mundial la industria del packaging se ve determinada por una serie de factores, que contribuyen a alcanzar transcendencia y conseguir así su forma actual. La aparición de supermercados y grandes superficies hace que la industria del embalaje comience a ser fundamental como elemento diferenciador ya que la competencia entre productos es feroz, la aparición de profesiones como diseñador industrial, la modernización de las prácticas de marketing y publicidad, el uso de la televisión a través de los anuncios como método de influencia para llegar al cliente y la mejora de las herramientas de diseño y el aporte de los ordenadores van a transformar el concepto de packaging de los productos como elemento diferenciador. (B2PACK, 2016)

2.2 Historia del airbag

El airbag comenzó a desarrollarse en la época de los 50, parcialmente por la industria aeroespacial y continuó hasta nuestros días por la industria automovilística, que invirtió grandes cantidades de dinero antes de poder llevarlo a un uso comercial. Los orígenes del Airbag se remontan hacia la segunda guerra mundial, cuando algunos pilotos de aviones disponían de trajes especiales que se inflaban para mantenerse a flote en el caso de tener un accidente sobre el mar y otro tipo de trajes que se inflaban si el piloto preveía que iba a tener una colisión. Una vez acabada la guerra, Estados Unidos era el único país cuya economía repuntaba con lo que hubo un boom en la industria automovilística que desembocó en grandes progresos y mejora tecnológica del sector.

En 1952 apareció la primera patente de un airbag, registrada por el norteamericano John Hetrick a quien se le ocurrió la idea tras sufrir un accidente con su familia. Una vez adjudicada la patente,

Hetrick se dedicó a enviar cartas a todas las marcas de coche para que incluyeran su idea en los automóviles, pero éstas nunca contestaron. El primer airbag concebido y patentado por Hetrick utilizaba un balón de aire comprimido y unos sensores de presión muy básicos para que el sistema funcionara. Por otro lado, en esa misma década, General Motors, Ford y Daimler iniciaron sus primeras investigaciones sobre el airbag. En 1957, Ford empezó sus investigaciones sobre el airbag como dispositivo de retención e inmediatamente se dio cuenta que era imprescindible desarrollar unos sensores y un sistema de llenado que actuaran más rápido. En la compañía Ford llegaron a la determinación que la bolsa debía hincharse entre 20 y 40 milisegundos después del impacto para que el sistema fuera eficaz.

En 1967, Allen Breed inventó un sensor electromecánico que resulto ser fundamental para que el sistema airbag pudiera llegar al mercado como dispositivo de retención de los automóviles. Este sensor electromecánico, que a día de hoy todavía se utiliza, consistía en una bolita de metal dentro de un tubo con uno de sus extremos magnéticos y en caso de accidente la bolita tocaba la parte magnética y detonaba el airbag. En 1968, La revista Science publicó un artículo sobre un sistema llamado “Auto-Cepto” en el que estaban trabajando en colaboración Ford y la universidad de Yale y que consistía en una bolsa que se interponía entre el salpicadero y los ocupantes delanteros del automóvil en caso de accidente.

A comienzos de los años 70 los investigadores aún no habían dado con la forma ideal para el llenado del airbag y la NHTSA (DGT estadounidense) impuso que para el año 74 los fabricantes deberían proporcionar un sistema de seguridad pasiva para retener a los conductores en caso de no llevar puesto el cinturón de seguridad. Los fabricantes no solo dudaban que el airbag fuera efectivo junto con el uso del cinturón de seguridad, sino que su mayor preocupación era lo que podía pasar en caso de activarse un airbag y que un niño pequeño fuera sentado encima de uno de los ocupantes de las plazas delanteras del vehículo. El primer automóvil con airbag fue el Oldsmobile Toronado de 1973, que usaba unas bolsas que se ubicaban replegadas detrás del volante y un dispositivo con propelente pirotécnico para el llenado que se alojaba en la guantera. Estas bolsas se inflaban delante de la cabeza y torso, pero debían cubrir también las rodillas. A mediados de los 70, e impulsada en parte por la nueva normativa de la NHTSA se produjo una nueva carrera tecnológica por ver quién era el primer fabricante en sacar al mercado un airbag fiable y con garantías de seguridad. Aunque Daimler estaba en ese momento terminando años de investigación sobre el funcionamiento de los airbags, lo cierto es que este sistema tuvo que volver a los laboratorios ya que desde que se lanzó en los primeros automóviles, estos provocaron algunas muertes entre los usuarios y se consideraban

bastante agresivos para los ocupantes más pequeños. Entonces ocurrió un acontecimiento histórico en 1981, lo que significó el cambio de liderazgo de la industria norteamericana a la europea.

En 1981, Mercedes lanzó un modelo Clase S que incluía un airbag como elemento de seguridad pasiva que funcionaba con una fiabilidad y efectividad totales. El airbag incluido en este modelo constaba de una unidad de control que enviaba la señal de activación en un tiempo inferior a 30 milisegundos y un cartucho con ácido sódico que reaccionaba de manera explosiva con nitrato potásico y así producir el nitrógeno que inflaba el airbag de nailon.



Ilustración 2. Airbag del sector automovilístico

En la década de los 80 se produjo la implantación definitiva de la electrónica en los automóviles y este suceso permitió perfeccionar el funcionamiento de los airbags e incluso el montaje de hasta 10 de estos airbags repartidos por el interior del coche y con tamaños de bolsa adaptados para cada posición. Pero la clave estaba no tanto en instalar muchos airbags sino en ajustar la velocidad con que se inflaban estos para reducir el número de muertes por inflado explosivo. Afortunadamente, la evolución del airbag no ha cesado en todos estos años y actualmente no solo se adaptan a la fuerza de impacto, sino que además de otros factores tienen en cuenta el peso de los ocupantes. (Cano, 2016)

2.3 Últimas evoluciones del airbag

La última tecnología con respecto a la seguridad de los motoristas es incorporar en la moto un software que traslada la información recibida desde los sensores incorporados a la moto para detectar colisiones hasta la chaqueta que lleva el piloto y mandar las órdenes de desplegar los airbags dentro de la chaqueta del motorista. Hasta ahora, estos sistemas integrados en las prendas tenían varios modos de funcionamiento diferentes; o bien mediante una unión mecánica a una de las partes fijas de la moto, de forma que cuando el conductor sufre un impacto y sale despedido, el airbag se despliega. O mediante la instalación de una centralita universal en la moto que disparaba en caso necesario el sistema de seguridad pasiva. Hasta hace poco los airbags estaban desarrollados para los vehículos de cuatro ruedas, pero en el mundo de la competición se ha visto como los airbags han evitado grandes lesiones en los pilotos de dos ruedas. Se trata de un conjunto de airbags incorporados en el mono del piloto y en caso de accidente éstos se despliegan en 30 milisegundos protegiendo la espalda, los hombros y el tórax. Un conjunto de girómetros y acelerómetros son los encargados de valorar cada situación y en caso de colisión enviar la orden para desplegar los airbags. (Oliva, 2018)



Ilustración 3. Chaqueta de motociclismo con sistema de airbags

Otra de las aplicaciones recientes para los airbags es como medio de seguridad para los deportes de invierno. En alpinismo y en el ski se está incorporando como complemento al material propio de cada deporte el llevar una mochila de airbags anti avalanchas. Estos airbags están diseñados para proteger al usuario en caso de ser cubierto por una masa de nieve. Poseen una alta efectividad y se ha demostrado que los usuarios de estas mochilas tienen un 89% de probabilidad de sobrevivir a una avalancha. Durante una avalancha, los cuerpos grandes tienden hacia la superficie de la masa

de nieve, mientras que los cuerpos pequeños se hunden hacia el fondo. Un sistema de airbags incorporado en una mochila con uno o varios globos que se inflan tras tirar de una cuerda está diseñado para hacer el volumen total del esquiador más grande por lo tanto emergerán de forma natural hacia la superficie en caso de avalancha. Un reciente estudio indica también que un 20% de las personas que llevan no llegan a utilizarlo y que la efectividad de este sistema se ve reducida por otros factores como por ejemplo el tamaño de la avalancha y la orografía del terreno donde se haya encontrado al esquiador. (Weakley, 2018)

Dentro de la seguridad de las cuatro ruedas Volvo ha desarrollado una nueva tecnología para proteger a los peatones en caso de atropello. Esta nueva tecnología se denomina Pedestrian Air Technology y se ha desarrollado tras analizar el porcentaje de muertes por atropello en los últimos años. Esta tecnología trata de minimizar el impacto soportado por el peatón cuando éste es alcanzado por un coche cuya velocidad sea entre 20 y 50 km/h y para ello básicamente realiza dos acciones; una es levantar el capó del coche unos centímetros para aumentar la distancia entre el peatón y los componentes bajo el capó y dos, despliega un airbag sobre la luna delantera del coche para amortiguar los posibles impactos que la cabeza del peatón pueda tener contra el cristal. Durante el desarrollo, esta tecnología se evaluó con diferentes tipos de prueba; tests de impactos sobre cabeza, test físicos e Ingeniería asistida por computador, para mostrar los beneficios del airbag para el peatón y la funcionalidad del capó. Para realizar un análisis general dinámico se utilizó un prototipo de peatón humano (dummy) y cuatro modelos humanos de diferentes tamaños diseñados por elementos finitos. También se evaluó la funcionalidad de los sensores de la parte frontal del automóvil con diferentes tamaños de objetos. (Lotta Jakobsson, 2013)

2.4 Mars Pathfinder

Uno de los antecedentes más importantes fue el envío de la sonda espacial Pathfinder al planeta Marte para hacer un reconocimiento de la superficie y de sus condiciones atmosféricas. Allá por Julio de 1997 la sonda llegó a Marte con un sistema de aterrizaje totalmente novedoso para su época y que consistía en el inflado de un gripo de airbags que rodeaban toda la sonda desde segundos antes al impacto. El proyecto Mars Pathfinder fue uno de la serie de bajo coste destinado a descubrir Marte. Despegó en diciembre del 1996 y aterrizó en la superficie de Marte en Julio de 1997. Aparte del propósito de estudiar la superficie del planeta Marte, esta misión se diferenció en la secuencia de entrada a la atmósfera, descenso y en esta última etapa de aterrizaje por un sistema de bajo presupuesto comparado con el sistema vernier que se utilizó en la misión Viking en 1970. Después

de utilizar los paracaídas y propulsores tradicionales utilizados en misiones anteriores para las etapas de entrada y descenso de la atmósfera, la Pathfinder afrontó el aterrizaje con un sistema combinado de propulsores retráctiles y un sistema de airbags para atenuar el impacto. La Pathfinder era una estructura tetraédrica de 290kg y después de soltar el paracaídas y desplegar los airbags, la nave afrontaba la superficie a 20 m/s en dirección de aterrizaje. Un subgrupo de airbags fue montado en cada una de las caras del tetraedro y cada subgrupo consistía en cuatro airbags conectados y tres generadores de gas que los inflaban. (D.CADOGAN, 1999)

2.4.1 Secuencia de aterrizaje

Entre 2 y 8 segundos antes del impacto en la superficie de Marte, el altímetro dio una señal a la nave para que esta a su vez diera la orden a unos dispositivos (uno en cada cara del tetraedro) que lanzaban unas correas de seguridad para cada subsistema de airbags. Medio segundo después de soltar las correas de seguridad, se daba señal a los generadores de gas. Estos generadores se encargaban de inflar los airbags hasta 10600 Pa en 1,5 segundos. Así la nave con los airbags colisionaba, revotando varias veces y rodando por la superficie de Marte hasta que se paró. La deceleración analizada por el centro de control fue de 19 G's (186,4 m/s²). La energía del impacto fue disipada gracias a que los airbags estaban interconectados a través de conductos interiores y a que los generadores de gas seguían suministrando a los airbags durante 20 segundos más a un ritmo más lento para compensar la contracción de gas debido a su enfriamiento en un entorno frío. Después que la nave se detuviera un sistema cabestrante montado sobre cada superficie del tetraedro de la nave conectaba unas cuerdas con la cara interior de los airbags para que fueran retrayendo la tela de los airbags. Una cuerda por cada airbag permitía atraer una aleta desplegable la cual tapaba un grupo de agujeros por los que salía el gas. Después de 54 minutos en los que el sistema de aterrizaje se iba desprendiendo de la nave, el estado de los airbags permitió la apertura de la nave.



Ilustración 4. Diseño de sistema de airbags para misión Pathfinder

2.4.2 Diseño del sistema

2.4.2.1 Generador de Gas

El generador de gas de la Pathfinder fue creado tras un gran esfuerzo de la Thiokol Corporation y la ILC de Dover. Este dispositivo de 3,25 kg estaba localizado en una celda en forma de doble cono fabricada en titanio. El generador expulsaba el gas en dos etapas: la primera y principal durante 1,85 segundos a un ritmo rápido para inflar los airbags y la segunda etapa durante 20 segundos a un ritmo lento para mantener los airbags con la presión necesaria para el impacto. El gas pasaba antes de ser expulsado hacia el airbag a través de un intercambiador de calor, donde los pellets de un propulsor endotérmico se transformaban en gas más frío.

2.4.2.2 Geometría del Airbag

Cada subsistema de airbags está compuesto por seis esferas de 1,8 metros de diámetro distribuidos en la forma de triángulo de billar. En el lado que toca con la nave hay un airbag en forma de triángulo equilátero que hace de transición. Un sistema de cordones externos e internos se encarga de contener las cargas de presión sobre las membranas del airbag, hacer más rígido el sistema de airbags y conectar cada subsistema de airbags con su respectiva cara del tetraedro de la nave.

El diseño precedente a su configuración final consistió en tres cilindros alargados de 2,4 metros de diámetro y juntos cubrían cada cara del tetraedro. Esta configuración inicial fue evaluada utilizando un modelo dinámico explícito en ABAQUS simulando un impacto vertical a escala y una combinación de superficie terrestre horizontal y vertical. Según los resultados obtenidos de este modelo los márgenes de impacto y deceleración eran más grandes que los requisitos técnicos.

Para optimizar la masa del sistema de airbags, fue reconfigurado a la geometría de seis esferas formando un triángulo descrito anteriormente. Con una presión inicial más alta y una menor carrera disponible todavía son aceptables los valores de carrera y deceleración con un 30% de ahorro de superficie y su correspondiente masa.

2.5 Otros antecedentes

El sistema de atenuación de aterrizaje mediante airbags es una de las tecnologías más importantes para disminuir la colisión de aterrizaje en lanzamientos de aire pesados. Hay muchas tecnologías de amortiguamiento como, la de estructura de panel, las cuales tienen una estructura complicada y son

bastante caros. El sistema de amortiguamiento mediante airbags es comparativamente más simple, conveniente, eficiente y barato. Puede absorber la mayoría de la energía de un aterrizaje para disminuir la fuerza de impacto mediante el vaciado progresivo del gas contenido en los airbags. Test de lanzamientos son fiables para investigar los sistemas de atenuación de aterrizaje mediante airbags, pero son demasiado caros. La seguridad y el tiempo son los otros problemas clave. Por lo tanto, es prácticamente imposible optimizar los parámetros del sistema de amortiguamiento de aterrizaje mediante airbags con sólo métodos experimentales. El desarrollo de tecnología de simulación hace superar estos problemas. Varios modelos de simulación mediante airbags fueron llevados a cabo. Es factible optimizar los parámetros del sistema de aterrizaje mediante la tecnología de la simulación. En este antecedente, un vehículo y su sistema de atenuación de aterrizaje mediante airbags fue modelado mediante elementos finitos y fue establecido como base de volumen de control y como método de elementos finitos. Este modelo fue validado por test de aterrizaje.

Otro sistema de aterrizaje experimental mediante inflado de airbags consiste en tres airbags conectados mutuamente por su parte más baja y a un soporte de recuperación. El soporte fue fabricado en acero y con espesor constante y una masa total de 3 Kg. Había tres platos circulares de acero en la base de la estructura y un plato con forma de triángulo equilátero en la parte alta. Para unir los platos de la base con el de la parte alta se utilizaron tres barras de acero. Los agujeros para los tornillos estaban distribuidos simétricamente en el plato triangular para facilitar la instalación de los bloques de masa y los sensores de aceleración.



Ilustración 5. Sistema airbags para experimento de caída

En esta imagen se muestra el diseño de la estructura del sistema de llenado del sistema de aterrizaje mediante airbags para el experimento de dinámica de impacto. Antes del experimento, El sistema

completo de llenado fue levantado hasta una altura y posición preestablecida usando una grúa puente y un cabrestante. Entonces, el gancho de la bomba de control estaba enganchado para soltar libremente el sistema de aterrizaje. Un sensor de aceleración se usó para medir la sobrecarga del aterrizaje del soporte de recuperación y un analizador de señal dinámica se usó para recoger los datos de aceleración. El esquema de funcionamiento del sistema de aterrizaje mediante airbags se puede ver en la figura 3.X. Este sistema fue elevado un metro sobre el suelo y utilizando el método de desenganchar, se observó que la velocidad de contacto entre los airbags y el suelo fue de 4,43 m/s. El sistema tenía una masa total de 5,9 Kg. Una muestra de tiempo se extrajo de cada intervalo de un milisegundo en ambas caras del pico obtenido experimentalmente de la sobrecarga de impacto. El valor del pico de sobrecarga de impacto se usó para construir una secuencia compuesta por 33 muestras.

La presión interna de los airbags y el módulo elástico equivalente del material con que estaban fabricados los airbags fueron elegidas como variables actualizables. Para la presión interna el rango de trabajo podía ir entre 101 y 105 kPa y para el módulo elástico el rango de trabajo se encontraba entre 300 y 500 MPa. Estas variables fueron normalizadas, resultando en un completo diseño experimental factorial con dos factores y siete niveles para resultar en un total de 49 puntos de muestra. La herramienta informática MSC. Dytran se utilizó importar los datos registrados por los sensores del sistema y así lograr una representación del experimento mediante elementos finitos. Los datos obtenidos directamente del experimento y de la simulación por elementos finitos fueron comparados y sus resultados concluyeron que en el pico de sobrecarga de impacto existía una diferencia de 0,37% entre unos resultados y otros. Se volvió a probar el experimento con una carga de un kilogramo superior y la diferencia de resultados entre los valores experimentales y los obtenidos por la simulación de elementos finitos fue de 1,55%. (He Huan, 2015)

2.6 Diversos sistemas de relleno y acolchado empleados en la actualidad

2.6.1 Plástico Burbuja

El film alveolar también llamado coloquialmente plástico de burbuja, es un material plástico flexible y transparente usado comúnmente para embalar artículos frágiles. Las bolsitas llenas de aire y espaciadas regularmente que sobresalen proporcionan amortiguación a los artículos.

Este material se fabrica con las burbujas de aire en diversos tamaños, dependiendo del tamaño del objeto a proteger y el grado de amortiguación requerido. Los diámetros de las burbujas pueden ir desde los 6mm hasta los 30 mm o más. Varias capas pueden ser necesarias para proporcionar protección contra impactos, mientras que una sola capa puede ser suficiente para proteger superficies. Además de la protección dada por las burbujas, el material plástico por sí solo puede ofrecer diferentes formas de protección para el artículo en cuestión. Por ejemplo, al transportar piezas y componentes electrónicos, se utiliza un tipo de envoltorio a base de plástico antiestático el cual disipa las cargas estáticas, de modo que así protege los chips electrónicos de las descargas que puedan dañarlos. Recubierto con papel de aluminio el film alveolar se utiliza como aislante térmico y acústico.

2.6.2 Film de Espuma

El polietileno expandido o espuma de polietileno, es un termoplástico del tipo de las poliolefinas. Su estructura está compuesta en un 98% de aire y en un 2% de hidrocarburos. Por su composición y ligereza, el polietileno expandido es un material muy útil para aplicaciones de empaque y embalaje. También suele utilizarse como aislante térmico y acústico sobretodo como la capa de amortiguamiento que va debajo de las planchas de parque prefabricado. El polietileno expandido se utiliza principalmente en el embalaje de productos delicados como televisores, computadoras, refrigeradores y lavadoras, también se utiliza como aislante térmico en ventanas, refrigeradores, camiones frigoríficos, muros y techos. En la industria de la automoción el polietileno expandido se utiliza en techos, paneles para puertas y cajuelas. En el sector de la construcción se utiliza en terrazas, suelos, techos y tuberías. Otros usos para el polietileno expandido son para fabricar colchonetas de gimnasia, fabricación de guantes, flotadores, zapatos y equipo de protección como rodilleras. Las ventajas más destacadas del polietileno expandido son: su peso ligero, es un material económico y reciclable, tiene una amplia vida útil, no es un material tóxico, se puede manejar con facilidad, buena capacidad de absorción contra impactos, ruidos, energía y vibraciones.

2.6.3 Perfiles de Espuma

También llamados cantoneras de espuma por su ubicación habitual en los embalajes y es que estos por lo general están pensados para proteger los cantos de los objetos. Las cantoneras están fabricadas en polietileno cuyas propiedades mecánicas son excelentes para la absorción eficaz de impactos. La espuma de polietileno es flexible y manejable, por lo que se adapta perfectamente a cualquier canto

o arista. Se utilizan para proteger las zonas de los objetos más expuestas a recibir un impacto dentro del embalaje ya que estos normalmente sufren todo tipo de sacudidas y vibraciones durante el transporte. Presentan gran variedad de formas, desde los tradicionales perfiles en L, pasando por perfiles de espuma en forma cilíndrica o hasta los más recientes en forma de U. Esta última forma presentada por este tipo de protección para embalajes se ha diseñado para facilitar la colocación de estos sobre los cantos o perfiles y además estos incorporan una pretensión inicial para que una vez colocados en el objeto a proteger queden totalmente sujetos y cumplan su función sin la preocupación de poderse despegar del objeto.

2.6.4 Chips de Relleno

El relleno de poliestireno ha sido concebido para rellenar cajas de cartón, proteger el objeto y evitar que el objeto se mueva durante el transporte. También llamado partículas de relleno o chips de relleno, este tipo de embalaje ofrece una protección eficaz de los productos independientemente de su forma y tamaño ya que es capaz de rellenar cualquier hueco que quede entre el objeto y el contenedor del mismo. La estructura celular cerrada de los chips y su forma especial ofrecen unas cualidades excelentes para el embalaje. Las partículas de relleno de poliestireno tienen una estructura elástica que permite absorber los choques y las vibraciones y después de una compresión recuperan su forma inicial. Una protección resistente, un buen efecto de bloqueo y la alta capacidad de absorción de la presión ofrecen una seguridad adicional. Este tipo de relleno es antiestático por lo que las células no se atraen entre ellas y puede dosificarse y emplearse cómodamente a granel. Debido a su mínimo peso puede ser un atractivo añadido como producto ya que reduce costes de transporte. Además de ser un sistema de embalaje flexible, simple y versátil, es respetuoso con el medio ambiente y 100% reciclable.

2.6.5 Sistema de Relleno Bolsas de Aire

La producción de almohadillas de aire es un proceso muy utilizado en el embalaje de mercancía que necesita protección contra movimientos e impactos. Se utilizan para rellenar huecos en las cajas o en los contenedores que no están completamente ocupados por la mercancía o para realizar una protección especial de las mercancías más delicadas. Los cojines de aire o las almohadillas de aire son muy eficaces en la absorción de impactos por lo que su uso es muy frecuente. También pueden utilizarse bolsas de aire para embalaje, similares a los anteriores formatos, pero de mayor tamaño. Gracias a esta variada posibilidad de formas y tamaños, se puede adaptar a las necesidades

requeridas, con lo que rellenan muy bien los espacios libres en las cajas o embalajes, evitando los desplazamientos de mercancía. Se fabrican con máquinas de uso sencillo que se alimentan con láminas de plástico preformado de poliuretano y se hinchán de forma automática o semi-automática. Los sistemas que proporcionan esta tecnología transforman el film de polietileno en bolsitas de aire presurizadas para proteger los productos y rellenar espacios vacíos en el interior del embalaje. Estos sistemas de aire son una protección adecuada para productos ligeros y frágiles. Son ampliamente utilizados en muy diversos sectores como la logística, el e-commerce, farmacia, cosmética, salud, eléctrico y electrónico.

2.6.6 Sistema de Relleno de Papel

Los sistemas de producción de relleno con papel son utilizados ampliamente en el embalaje de mercancía. El relleno de papel tiene capacidad de amortiguación y además permite rellenar los espacios vacíos, con lo que se evitan los desplazamientos de las mercancías que no ocupan la totalidad del espacio de embalaje. Las máquinas que producen este papel destinado al relleno pueden tener diferentes características. Algunas son simples trituradoras de papel o cartón de desecho, con lo que su función es doble, ya que permiten el aprovechamiento de un residuo y la obtención del producto deseado. En otros casos, las máquinas pueden ser un poco más sofisticadas y producir papel acolchado o almohadillas de papel con mayor capacidad de amortiguación. En general, las máquinas que se utilizan para fabricar papel de relleno son máquinas pequeñas, compactas y se pueden instalar con gran facilidad, como parte de una cadena completa de embalaje o fabricando el papel en función de las necesidades de cada momento. Este tipo de maquinaria utiliza como alimentación papel reciclado o papel kraft. Este tipo de relleno para embalaje es capaz en los mejores casos de reducir hasta un 90% las fuerzas G soportadas por los productos transportados a causa de un fuerte impacto o caída. Este sistema ofrece una reducción de costes al optimizar la cantidad de material utilizado para el relleno del embalaje sin olvidar que la materia prima es reciclable y respetuosa con el medio ambiente. Una de las tecnologías de este sistema de relleno es el llamado papel plegado y permite a cualquiera pueda moldear de forma efectiva el papel de una sola capa en un material de relleno para proteger productos durante su transporte. No se requiere electricidad y se elimina el arduo trabajo de comprimir manualmente el papel. Los paquetes plegados de papel ofrecen una manipulación sencilla, un tiempo de carga mínimo y menor coste de almacenamiento. El papel está perforado cada 18 cm, lo que permite al usuario ajustar la longitud del papel para rellenar cualquier espacio vacío.

2.6.7 Espuma Expandible

Este tipo de material de relleno se utiliza frecuentemente para la protección de piezas frágiles gracias a su alta propiedad de amortiguación. Entre estas aplicaciones, los componentes de la espuma expandible están sujetos a diferentes condiciones de carga como cargas estáticas o cargas de impacto. Además, es necesario estudiar las propiedades mecánicas de la espuma expandible en varios rangos de tensión, especialmente en el rango medio-alto de tensión el cual es esencial para un uso óptimo de la espuma expandible que vaya ser utilizado en la absorción de impactos. El comportamiento mecánico de los materiales de espuma expandible ha sido extensamente investigado por la comunidad científica. Como en muchos estudios previos, está claro que el comportamiento mecánico de la espuma expandible esta intrínsecamente determinado por la matriz interior del material y su microestructura celular. Los estudios de comportamiento dinámico de una espuma blanda de poliuretano similar también se han llevado a cabo y han llegado a la conclusión que la rigidez, límite de rotura, tensión máxima y energía de absorción de las espumas de polímero dependen del rango de tensión. La sensibilidad del rango de tensión de una espuma de polímero generalmente se le atribuye a su respuesta visco elástico-plástica del material madre y a su micro estructura interna.

2.6.8 Cartón Nido de Abeja

El cartón es un elemento que se fabrica a partir de la superposición de paneles con el objetivo de obtener un material con unas propiedades únicas en cuanto a resistencia, ligereza y versatilidad. El cartón es un material que cada vez tiene mayores aplicaciones en diferentes sectores como el diseño industrial, mobiliario, arquitectura. Entre los múltiples tipos de cartón, destaca el cartón nido de abeja por su estructura interna y por sus capacidades para soportar carga. Este tipo de cartón está formado por dos paredes exteriores y una estructura interior, al igual que el cartón corrugado pero la diferencia entre ellos es que la estructura interior del nido de abeja no es un papel cartón ondulado, sino que tiene una estructura hexagonal que recuerda los panales de abeja. La característica fundamental de este cartón es su imbatible relación entre ligereza y rigidez. Es ideal para hacer todo tipo de elementos de gran formato que no pandeen.

2.6.9 Tecnología pack&strat

Es una de las últimas tecnologías utilizadas en la industria del embalaje y procura una elevada protección al producto. Esta tecnología se inspira en la impresión 3D y como tal, es a base de capas como se genera la protección del producto. Las capas que van a proteger el producto suelen ser generalmente de cartón, de espuma, de corcho o cualquier material que este en formato plancha. Los requisitos básicos a tener en cuenta a la hora de diseñar este tipo de embalaje son: la forma exterior del producto/ objeto a proteger y el recipiente donde va a ser transportado. Los sectores industriales que más están utilizando esta tecnología son el de la automoción y el aeronáutico ya que a menudo tienen que enviar muchos productos a diferentes localizaciones, fábricas o sucursales y estas están repartidas a lo largo del planeta con lo que estos objetos recorrerán largas distancias y es fundamental que el embalaje de estas piezas sea lo más efectivo posible. Los productos que estas industrias envían para transporte suelen ser frágiles, tener un elevado valor añadido y geometrías muy complejas por lo que alcanzar un correcto empaquetado se puede complicar. El proceso de diseño y fabricación del embalaje a medida para el producto se realiza en pocos pasos. El primero de los pasos es escanear el objeto con una cámara que junto con un software 3D consiga generar un modelo digitalizado del producto que se quiere proteger con el embalaje. A continuación, se deben determinar unos parámetros para el diseño del interior del embalaje como son: la orientación del objeto dentro del embalaje, tipo de embalaje exterior, tipo de material para el embalaje interior, espesor de las capas de protección, etc... Después se introducen las capas de material en la máquina que se encarga de cortar estas con las instrucciones previamente introducidas y, por último, se van introduciendo en la caja junto con el objeto y así se forma la protección de embalaje.

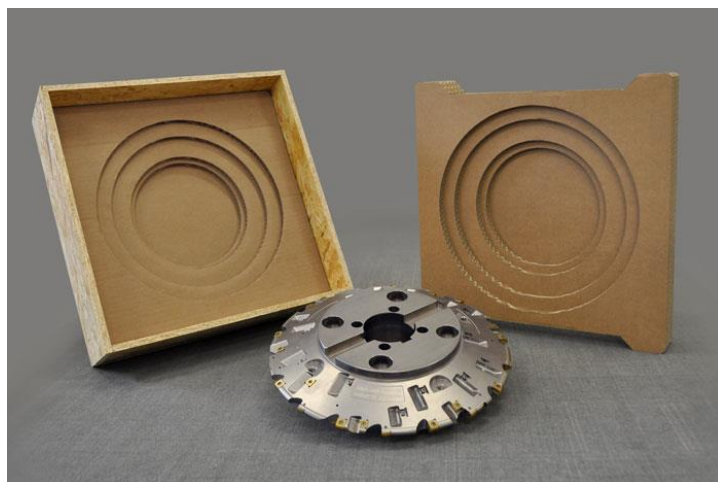


Ilustración 6. . Strat pack para filo fresadora

Para cortar las planchas de material de embalaje se utilizan unas estaciones de corte que usan la misma tecnología que las impresoras 3D para desplazarse por las tres direcciones principales con libertad de movimiento, pero con diferentes posibilidades de corte. Para realizar el corte unas estaciones utilizan micro fresas, otras laser, alambre y otras una hoja de cúter. Además, esta tecnología promueve la utilización de materiales reciclables y biodegradables ya que usa como material de protección para embalaje el cartón, el corcho, madera y otros materiales de hoja hechos de fibras naturales.

2.7 La utilidad del aire comprimido

Hoy en día el almacenamiento de la electricidad tiene una importancia en alza porque los aerogeneradores y las plantas de paneles fotovoltaicos están supeditados a la intermitencia de los días de viento y sol. En este caso, el aire puede servir como herramienta útil para almacenar la energía mediante la compresión del aire a través de un compresor eléctrico y en cualquier momento se puede utilizar el aire comprimido para generar electricidad a través de una turbina. En el sector industrial el aire comprimido se utiliza en casi todos los procesos, pero nunca se ha considerado como portador de energía. En comparación con la electricidad, gas y calor, la densidad de potencia del aire comprimido es menor y sus pérdidas en su transporte son mayores, razones de su situación actual como fuente de energía. Sin embargo, el aire comprimido ha sido y todavía es considerado como medio de almacenamiento de energía a escala de utilidad.

El concepto básico de CAES (Compressed Air Energy Storage) es bastante simple. El aire almacenado es cargado por un compresor eléctrico, que se ocupa de transformar la energía eléctrica en energía potencial, también llamado exergía (potencial útil de una cantidad de energía en cierto estado especificado) de aire comprimido. (Vera, 2015). El aire comprimido es almacenado en volúmenes de almacenaje de aire comprimido de cualquier tipo y este puede ser suministrado bajo demanda y producir electricidad a través de su expansión por medio de una turbina de aire. Hoy existen gran variedad de depósitos para aire comprimido según las necesidades y aplicaciones para que se vayan a usar. Una clasificación general de este tipo de depósitos es según la importancia que se dé a la temperatura en el proceso; por ello los depósitos pueden ser, diabáticos, adiabáticos e isotermos.

En los depósitos diabáticos, el calor producido en la compresión de aire es liberado al ambiente a través de una bajada de temperatura del aire comprimido. Por lo tanto, se necesita una fuente de

calor externa para evitar la condensación durante la descarga y el congelado de la máquina de expansión a través del precalentamiento del aire comprimido aguas arriba del expansor. En los depósitos adiabáticos, el calor producido en la compresión del aire se captura en almacenes de energía térmica (TES) y es utilizado previamente a la expansión para evitar la necesidad de otras fuentes de calor durante la fase de descarga. En cambio, en los depósitos isotermos se trata de prevenir el aumento de temperatura en los compresores durante la carga y la caída de la temperatura en los expansores durante la descarga de gas. El funcionamiento de los depósitos isotermos se basa en un cilindro pistón, el cual realiza la compresión y expansión de aire a unas velocidades tan bajas que el calor producido por estas acciones se disipa en el propio cilindro pistón.

El aire comprimido puede ser almacenado tanto en un volumen constante (isocórico) como a presión constante (isobárico). En caso de ser almacenado en un volumen constante, la presión varía y eso indica el nivel de carga del depósito. El ejemplo más común de almacenamiento de aire comprimido a volumen constante son los depósitos de acero. El almacenamiento de aire comprimido a presión constante requiere una variación de volumen para mantener la presión a un nivel constante durante al carga y descarga de estos depósitos. El almacenamiento de aire comprimido a presión constante se puede realizar usando por ejemplo un depósito de compensación hidráulico. Este mantiene la presión casi constante gracias a un segundo depósito de líquido ubicado a una cota hidrostática mayor. (Marcus Budt, 2016)

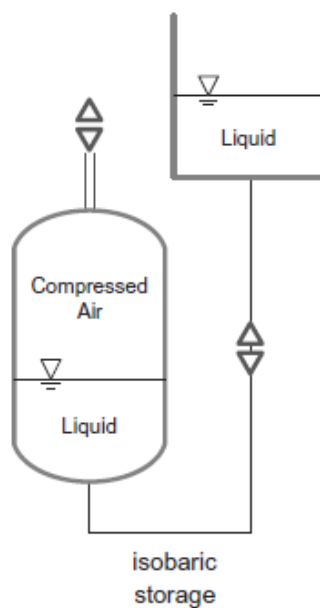


Ilustración 7. Esquema funcionamiento Aire comprimido a presión constante

2.8 Entorno socioeconómico del packaging

Pese a la caída general del consumo, la estabilidad de las cifras demográficas y las malas previsiones de natalidad, la industria del packaging parece haberse interesado por el mercado español por lo que nuestro país ha realizado una de las mayores inversiones durante 2017. La fluidez de crédito en la actualidad hace presagiar que en 2018 esta tendencia tendrá continuidad en todos los sectores. La necesidad de intercambiar información y sumar esfuerzos hace que se creen fusiones de empresas, pero no todas las empresas tienen la capacidad económica para lograrlo así que recientemente se tiende a colaborar entre empresas a veces de ámbitos muy distintos. En esta época en el que el liderazgo es el modelo a seguir en un entorno competitivo, volver a un sistema colaborativo representa un cambio de concepto bastante atractivo. El sistema colaborativo se está produciendo entre empresas locales, multinacionales e incluso entre empresas de perfiles completamente distintos. Este nuevo sistema está especialmente indicado para la investigación de nuevos materiales que acercan la industria del packaging a los modelos de economía circular. La economía circular es una estrategia que tiene por objeto reducir la entrada de materiales como la producción de desechos y poder así cerrar el círculo de los flujos económicos y ecológicos de los recursos. La industria del packaging se adapta a todo tipo de sectores demográficos pero su propia esencia está cambiando. En sus inicios el packaging estaba pensado para proteger y conservar el producto que envolvía, pero actualmente debido a la agresiva competitividad las empresas invierten grandes sumas para hacer exteriormente atractivo el envase y poder así mantenerse en el mercado.

Actualmente, según las nuevas tendencias de marketing, el envase debe ser capaz de interactuar con el cliente en forma de diferentes texturas, olor característico de la marca, creación de contrastes térmicos, etc. La industria ligada al consumo tiene como objetivo que la experiencia del cliente mientras hace la compra sea más satisfactoria y el sector del packaging puede conseguirlo a través de la investigación de posibles interacciones con el cliente a través de los envases. El mercado de las principales materias primas (papel, metal y plásticos) está sufriendo un auge de precios en todo el mundo y no parece que vaya a mejorar en los próximos años. Para el papel se esperan aumentos generalizados para los primeros meses del año, para el plástico la demanda se ha ralentizado y para el metal se prevé un alza de precios. Al principio de la crisis, muchos grupos empresariales que habían experimentado un rápido crecimiento previamente se encontraron de repente con deudas ingentes bajo su responsabilidad. En la mayoría de los casos la solución fue refinanciar la deuda, dejando ésta en manos de inversores especializados con la misión de devolver a las empresas de packaging la rentabilidad perdida. A este suceso hay que añadirle la venta de otros grandes grupos

de packaging a fondos de inversión y grandes bancos que en esa época tenían excedentes para hacerse con ellos. Los fondos de inversión y los grandes bancos suelen invertir el dinero en unas empresas hoy y en otras empresas mañana. Ahora que la economía parece que está remontando, los grandes bancos quieren recuperar la inversión realizada en empresas de packaging durante la época de crisis. Después de recuperar el capital invertido varios de estos fondos financieros se retirarán de las compañías en las que han invertido, pero no del sector del packaging.

3 METODOLOGÍA

Para la optimización del sistema de protección y amortiguamiento de la bombilla se van a crear diferentes modelos de protección y se va a modelizar cómo éstos impactan contra una superficie rígida lisa. Para la simulación de impacto entre los diferentes sistemas y la superficie lisa se va a considerar que el sistema cae desde una altura próxima a la superficie lisa con una velocidad constante. Para establecer la velocidad inicial proporcionada al sistema para su simulación se ha supuesto una situación real de caída donde la bombilla instalada en el techo de un hogar cae desde una altura de 3,5 metros, con lo que se obtiene una velocidad de impacto de 8,3 m/s. Se tomará una medida de aceleración como variable de control como método de comparación entre los diferentes sistemas. Además, se obtendrán medidas de tensiones máximas equivalentes, deformaciones máximas experimentadas por los sistemas y evoluciones de los sistemas en forma de energía de deformación recuperable.

3.1 Orígenes de la metodología por elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) surgió de la necesidad de resolver problemas complejos de análisis estructural en ingeniería. Alexander Hrennikoff y Richard Courant fueron los primeros que comenzaron a desarrollar este método. La esencia fundamental del método que utilizaban Hrennikoff y Courant era la misma que se utiliza actualmente: la discretización de un dominio continuo en un conjunto discreto de elementos. Hasta que este método no se llegó a desarrollar los científicos no tenían herramientas muy potentes para utilizar en el estudio de fenómenos físicos de gran envergadura así que para obtener diferentes resultados a base de cambios de variables básicamente tenían que realizar multitud de experimentos para poder compararlos y llegar a conclusiones para poder seguir optimizando los experimentos y así lograr la evolución de sus proyectos. Gracias a las herramientas de software que aplican el método de elementos finitos se eliminan las barreras para abordar casi cualquier fenómeno físico y se está aprovechando más eficientemente el dinero y tiempo empleados en proyectos que hace no muchos años se consideraban imposibles de abordar. Las principales ventajas de la aplicación de este tipo de herramientas son; mayor precisión de resultados, un mejor conocimiento de los parámetros de diseño de los productos, la creación de prototipos virtuales, un ciclo de diseño más rápido, mayor productividad e ingresos.

3.2 Introducción al MEF

El método de elementos finitos es un proceso de cálculo numérico computacional basado en la teoría de los trabajos virtuales e implementado en multitud de aplicaciones de diseño ingenieril para analizar el comportamiento físico de elementos. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero resolver infinidad de problemas estructurales, de mecánica de sólidos e incluso de comportamientos fluidos. Este método ha supuesto un gran avance para el mundo de la ingeniería por el ahorro de tiempo y dinero que supone utilizar esta herramienta, pero hay que tener en cuenta que las soluciones que se extraen de este método no son exactas sino una aproximación muy ajustada a la solución real.

La idea en que se basa el funcionamiento de este método consiste en dividir un continuo en elementos más pequeños interconectados entre sí a través de puntos a los que se denomina nodos. Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del sólido continuo también gobernarán el comportamiento de los elementos en que se ha subdividido el continuo. De esta manera se ha convertido un problema de un sólido continuo que es gobernado por un sistema de ecuaciones diferenciales a un problema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento será gobernado por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el continuo subdividido en elementos. Los diferentes tipos de dominios se subdividen en puntos imaginarios en caso de un dominio lineal, en líneas imaginarias en caso de un dominio bidimensional y en superficies imaginarias en caso tridimensional. Los elementos se definen por un número discreto de puntos denominados nodos y son los nexos de unión entre los diferentes elementos. Sobre estos nodos se determinan las incógnitas fundamentales de los problemas. Así, por ejemplo, en el momento que determinemos el desplazamiento que sufrido uno de los nodos de un elemento podríamos deducir que deformación se ha generado en el elemento al que pertenece ese nodo.

El sistema debido a las condiciones de contorno evoluciona hasta un estado final. En este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema se puede determinar cuáles de los nodos han sufrido desplazamiento y a partir de los desplazamientos se puede hallar las tensiones y deformaciones de los elementos que unen los nodos. Planteando la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento del continuo para el elemento, se concluye en fórmulas que

relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este proceso se realiza por medio de las funciones de interpolación.

Para la resolución del problema el sistema que se utiliza es en forma matricial por su facilidad de operación a través de ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento se ensamblan con los vectores desplazamiento y fuerzas y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas cuya solución nos indica los valores de desplazamiento de los nodos del sistema.

3.2.1 Funciones de interpolación

Considera un sólido sometido a un campo de fuerzas volumétricas y de superficie como también sometido a unas condiciones de ligadura o de contorno, lo que este método consigue es asignar el campo de desplazamientos de cada elemento a través de los desplazamientos que se producen en los nodos de ese mismo elemento ya que las fuerzas exteriores generan unos esfuerzos en el sólido y consecuentemente unos desplazamientos.

Para obtener el desplazamiento de los nudos de cada elemento se necesita la matriz de rigidez la cual puede ser de dos dimensiones si el sólido es articulado o de tres dimensiones si el sólido es rígido. La matriz de rigidez se multiplica al vector desplazamientos y el resultado de esta multiplicación resultaría en el vector fuerzas externas al sólido. Si se despeja el vector desplazamientos y se multiplica la inversa de la matriz de rigidez por el vector fuerzas se obtiene el vector desplazamientos. Con el vector desplazamientos se pueden obtener los esfuerzos y las fuerzas en los nudos.

3.3 La eficacia de un análisis de elementos finitos para el diseño de un embalaje

Las herramientas de software basadas en la teoría de los trabajos virtuales y el análisis por elementos finitos son generalmente utilizadas por matemáticos, científicos e ingenieros. Son una herramienta de cálculo que ayudan a predecir como un producto se van a comportar ante situaciones físicas reales tales como fuerzas de impacto, vibraciones o comportamiento aerodinámico. Un análisis por elementos finitos puede mostrar tanto si un producto se va a romper como si se va a desgastar o como si no cumple para función para la que fue diseñado el producto. El análisis por elementos

finitos se ha convertido en una herramienta completa para muchos diseños ingenieriles gracias a su capacidad para predecir comportamientos físicos en nuevos diseños o procesos antes de fabricar o implementar los prototipos. El uso de diseños simples y procedimientos de evaluación no pueden evaluar de forma realista la respuesta de muchas estructuras y propiedades tales como tensión de rotura, comportamiento inelástico o características de carga distribuida. Para predecir estos comportamientos, es necesario el uso de métodos analíticos o experimentos y en muchos casos no son suficientes. El embalaje de la comida es un requisito imprescindible para proteger al producto envasado de agentes externos que puedan provocar contaminación, daño físico y aplastamiento. Últimamente, el objetivo principal del diseño de embalajes está orientado a minimizar el daño mecánico del producto envasado durante el ciclo de distribución y mejorar la respuesta global del embalaje. El diseño del embalaje incluye la selección óptima de materiales, la selección de la geometría exterior y el control de coste del embalaje. El diseño óptimo para un embalaje debe ser capaz de proporcionar suficiente rigidez y estabilidad al paquete.

(Tobi Fadiji, 2018)

3.4 El módulo Explicit

Abaqus /Explicit es una herramienta de análisis por elementos finitos particularmente preparada para simular sucesos dinámicos de breve intervalo de tiempo como, por ejemplo; resistencia a choques automovilísticos, impactos balísticos o pruebas de caída electrónica de consumo. La capacidad de este módulo Explicit para manejar eficazmente un comportamiento no lineal severo, como son los contactos, lo hace muy atractivo para la simulación de muchas situaciones reales cuasi estáticas como el laminado en caliente de un metal o el aplastamiento lento de dispositivos de absorción de energía.

La dinámica de impulsiones se encarga de estudiar las situaciones en las que se producen cambios súbitos en la cantidad de movimiento o en el momento cinético de sistemas materiales. Estos sucesos se les denomina impactos, choques o percusiones y conllevan fuerzas muy elevadas que actúan durante un periodo de tiempo muy corto. Esto permite despreciar el resto de fuerzas involucradas en el intervalo de tiempo que dura el impacto porque su magnitud frente a las de impacto es mucho menor. En la dinámica de impulsiones se acepta que el cambio de movimiento es instantáneo, de manera que sólo se analiza el salto de tiempo entre el momento inmediatamente anterior al impacto y el momento inmediatamente posterior al impacto del sistema material. Se emplea un modelo simplificado en el que se desprecian las deformaciones y la transmisión de ondas

de tensión de los sólidos elásticos, pero del que puede obtenerse una solución válida siempre que las condiciones se aproximen a las de una impulsión teórica.

Cuando el problema que se está resolviendo tiene en cuenta no linealidades (geometrías o materiales) se trata a través de un conjunto de ecuaciones no lineales. Lo que se asumía en problemas elásticos como valores constantes (matriz de rigidez K y cargas externas f) ahora ya no lo son. Lo que hay que hacer en estos casos es aplicar un enfoque gradual con el objetivo de dividir el problema global en muchos problemas lineales por tanto la reducción de la solución requiere ser resuelta de forma implícita. Por ejemplo, si se analiza una viga en voladizo con una carga puntual en el extremo de 100kN y se considera la no linealidad del material de la viga entonces se tiene que dividir la carga puntual externa en por ejemplo diez incrementos de carga y aplicar esos incrementos de carga en momentos de tiempo o pasos de carga. En cada paso de carga se tendrá que calcular el momento generado por esta en el empotramiento y compararlo con el momento plástico. Si el momento máximo en el empotramiento es más pequeño que el momento plástico entonces se está dentro de la región elástica.

Cuando se entra en la región plástica por primera vez, la matriz de rigidez ha de ser actualizada. Esto es porque el material se ha deteriorado en la zona de empotramiento que corresponde a la zona de máximos momentos. El módulo elástico o módulo de Young cambiará debido al endurecimiento por deformación y las constantes de rigidez lo harán acorde también. Si el módulo de elasticidad E ha disminuido tras la plastificación significa que el material se ha ablandado. Si la matriz de rigidez tiene un carácter más blando entonces los desplazamientos que se obtendrán serán más largos. También se sabe que las fuerzas internas deben ser equivalentes a las fuerzas externas para que haya un equilibrio. Por tanto, en el caso que se inicie el estado no lineal por primera vez (que se resuelve matricialmente a través de $f=K*u$, asumiendo que la rigidez es elástica y en verdad no lo es), se obtendrá un desequilibrio de fuerzas que necesitará ser equilibrado en la siguiente iteración. Aquí es donde se inicia el proceso de la solución implícita, a través de resolver el desequilibrio de fuerzas después que se actualice la matriz de rigidez. Esto se hace internamente hasta que el desequilibrio de fuerzas es relativamente pequeño (hasta que el criterio de convergencia se satisfaga). Cuando se alcance la convergencia es el momento de pasar al siguiente incremento o paso de carga y realizar el mismo procedimiento.

La ventaja de las soluciones implícitas es su exactitud en términos de comportamiento mecánico ya que los resultados obtenidos son más realistas que si se considerara un problema únicamente elástico

lineal. Pero al mismo tiempo estas soluciones sufren de estabilidad numérica especialmente cuando el problema presenta grandes asimetrías y es imperativo que el usuario tenga un conocimiento teórico más fuerte y experiencia para hacer frente a este tipo de métodos. (Markou, 2014)

3.5 Interés por la aceleración como variable de análisis

Los sensores instalados en los sistemas de seguridad de los coches por ejemplo son acelerómetros, giróscopos y sensores de presión. Estos son los encargados de mandar las señales de entrada a las centralitas reguladoras de los coches para que se desplieguen los airbags. Es por ello que en este trabajo se busquen los resultados de aceleración ya que con estos datos se pueden establecer los sensores para que cuando detecten una aceleración ligeramente inferior manden la señal de apertura de airbags a la centralita del automóvil. Normalmente el umbral de trabajo que se utiliza en los acelerómetros instalados en los automóviles esta entre 3 y 5 G (1G equivale a $9,81 \text{ m/s}^2$).

El ejercicio de análisis de este trabajo es un claro ejemplo de sistema no lineal ya que a priori no se puede estimar cual va a ser el resultado del comportamiento de este sistema frente al impacto contra una superficie rígida. La mayoría de los sistemas físicos en la naturaleza son de tipo no lineal y pueden llegar a tener un comportamiento sorprendente en algunos casos. En unos casos los sistemas no lineales pueden alcanzar unas dinámicas totalmente diferentes según el valor de los diferentes parámetros y en otros casos los sistemas no lineales pueden ser muy sensibles a las condiciones iniciales de los estados. Sin embargo, estos sistemas no lineales se pueden tratar gracias a herramientas de aproximación como sistemas lineales y poder así obtener resultados.

La estabilidad es una de las características de los sistemas dinámicos más importantes ya que esto implica que el sistema está controlado y no existe la posibilidad de movimiento autónomo. La riqueza dinámica de los sistemas no lineales es que se les considera imprevisibles y se comportan de una manera poco evidente. Una de las características evidentes de su respuesta aleatoria es la existencia de múltiples puntos de equilibrio aislados. En un estado lineal solo tiene un punto de equilibrio aislado correspondiente a un estado de régimen estacionario y si el punto de equilibrio es estable entonces el estado final del sistema siempre será el mismo independientemente de cual sean las condiciones iniciales. Pero en un sistema no lineal existen múltiples puntos de equilibrio aislados por los que es importante analizar cuantos puntos de equilibrio aislado sean posibles para tener un conocimiento aproximado del sistema no lineal.

Según la estabilidad de Lyapunov; un punto de equilibrio de un sistema dinámico es estable si todas las soluciones que nacen en las cercanías del punto de equilibrio permanecen en dichas cercanías y un punto de equilibrio se considera asintóticamente estable si todas las soluciones que inicien en las cercanías del punto de equilibrio no sólo permanecen en las cercanías del punto de equilibrio, sino que además tienden hacia el equilibrio a medida que el tiempo se aproxima al infinito. (Anzurez M. Juan, 2008)

Habitualmente cuando se trabaja con sistemas dinámicos modelados mediante un número “n” finito de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, donde las variables representan el historial de estado del sistema dinámico, se suele utilizar la notación vectorial para representar de forma compacta las “n” ecuaciones en forma de una única ecuación diferencial vectorial de dimensión n. Un sistema no lineal se puede aproximar al comportamiento lineal si se cumplen las siguientes condiciones:

- Si el rango de operaciones es pequeño.
- Si las no linealidades involucradas son suaves.
- Si su dinámica se describe mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales.

3.6 Diferentes configuraciones de posición de caída

En este trabajo se va a analizar tres modelos diferentes de sistemas de amortiguamiento para la protección de una bombilla en su caída simulada desde la pared superior de una casa situada a 3 metros sobre el suelo. De estos tres modelos se obtendrán las aceleraciones máximas computadas entre las aceleraciones longitudinales y las aceleraciones rotacionales, las deformaciones máximas y un balance energético de la deformación sufrida por el sistema y que este tiene la capacidad de recuperar gracias a la compresión del gas interno de los airbags. Este sistema de amortiguamiento consiste en rodear al objeto a proteger de un conjunto de bolsas de aire rellenas de un gas con propiedades de gas ideal, pero con una presión elevada para soportar las fuerzas de reacción generadas a consecuencia del impacto entre el sistema y el suelo. Dentro de este contexto uno de los objetivos principales de este trabajo es la optimización del sistema a través de la modificación de los parámetros susceptibles de lograr una mejora en estos sistemas con el fin último que la aceleración soportada por el objeto sea la menor posible. Tales parámetros pueden ser; desde la

geometría y número de airbags instalados en la cara externa del objeto, pasando por los materiales utilizados para la construcción de los sistemas y airbags, hasta las condiciones de trabajo de los sistemas de amortiguamiento (airbags). Normalmente los diseños de los sistemas de amortiguamiento se han realizado en base al diseño del propio objeto (la bombilla), es decir, que a partir de la disposición vertical de la bombilla se han creado los airbags.

Después de lanzar las simulaciones de los sistemas en dirección vertical se ha variado la orientación de la caída de los sistemas para tener una visión más completa del funcionamiento básico de estos sistemas ya que la geometría externa de los airbags y la geometría de conjunto externa del sistema puede contribuir a la formación de giros indeseables tras la primera colisión o todo lo contrario que amortigüe también los giros sobre sí mismo del sistema. Además, dependiendo de la geometría externa del conjunto, las aceleraciones que soporte el sistema pueden aumentar exponencialmente ya que un sistema cuya geometría exterior favorezca las rotaciones sobre sí mismo tras la primera colisión provoque que en la segunda colisión se multiplique los valores de aceleración soportados por el objeto. La geometría de la superficie de contacto suelo s un plano infinito con características de solido indeformable por lo tanto ésta no se puede modificar, pero la superficie de los airbags sí. Las geometrías angulosas favorecerán los giros de los sistemas sobre sí mismos y las superficies romas de los airbags disminuirán este efecto poco beneficioso para el amortiguamiento del objeto.

3.7 Análisis de sensibilidad de la malla

La aplicación de modelos matemáticos sofisticados y de software especializado a la solución de problemas de ingeniería, y como herramienta docente y de investigación, es una práctica común en los últimos tiempos, sobre todo en países industrializados. Estos modelos y su correspondiente software especializado hacen posible en la actualidad el estudio detallado de problemas de ingeniería que antes eran inmanejables debido a la complejidad de los fenómenos naturales. Estas herramientas permiten analizar una gran variedad de fenómenos físicos de una manera rápida y eficaz. Las herramientas de software computacional basadas en el método de elementos finitos deben hacer uso del mallado del objeto de estudio. Esto quiere decir que el objeto de estudio se subdivide en pequeños elementos de geometría simple interconectados por sus aristas a través de los nodos. La malla es un paso fundamental para el estudio de comportamiento de los objetos ya que según sea la densidad de los elementos que componen la malla, ésta ofrecerá unos resultados más aproximados a la realidad. Hay que recordar que la herramienta de software de simulación

basadas en el método de los elementos finitos ofrece una solución muy aproximada a la realidad sin llegar a proporcionar la solución exacta a los problemas propuestos.

Como se indicaba anteriormente, los resultados del análisis serán más realistas cuanto mayor sea la densidad de elementos de la malla, pero el inconveniente es que si la malla es muy densa entonces el tiempo que el programa necesita para realizar los cálculos es mayor. Por tanto, tiene que existir un equilibrio entre densidad de malla y tiempo computacional. Para las compañías el tiempo es un recurso determinante por eso en los ejercicios de análisis es importante realizar un estudio de sensibilidad de la malla. Un estudio de sensibilidad de la malla consiste en visualizar como responde una variable a medida que se va modificando la densidad de elementos de la malla. El objetivo principal de este estudio es observar cómo la variable de interés va convergiendo hacia un valor concreto. En otras palabras, existe un tamaño de malla a partir del cual el resultado obtenido no difiere del anterior. Es por ello que si se localiza ese tamaño de malla se podrá obtener unos resultados bastante ajustados a la realidad empleando el mínimo tiempo computacional posible. La gráfica que se muestra a continuación representa el análisis de sensibilidad de malla realizado para obtener el tamaño de malla óptimo que proporcione unos resultados fiables. Para realizar el análisis de sensibilidad se ha tomado la primera tipología de sistema de airbags (la que tiene forma de esfera) y se ha ido modificando el tamaño de la malla para observar cómo variaba la aceleración máxima computada en dirección vertical (ACOM 2). Este modelo corresponde con el que posee una presión interna de 5 kPa y se ha ido modificando el tamaño de malla desde un valor de 0,1 hasta 0,0018 a intervalos regulares. Como se puede observar en la gráfica existe una tendencia de aceleración ACOM 2 hacia el valor de $9,3 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$. Este valor de aceleración se repite desde que el tamaño de malla es de 0,06 por tanto, éste tamaño de malla es el óptimo para obtener unos resultados fiables.

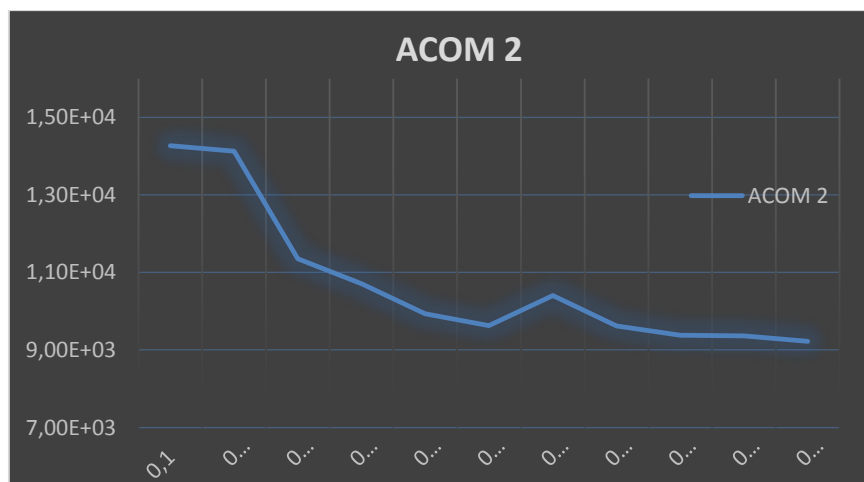


Ilustración 8. Gráfica de sensibilidad de malla

4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo que se va a tomar como referencia para la descripción va a ser el que haya conseguido soportar las menores aceleraciones tras el ensayo de impacto. Este modelo habría conseguido proteger el objeto mejor que los otros ensayos gracias a la configuración de los airbags. El modelo seleccionado se compone de la representación de una bombilla led introducida en un sistema de airbags que rodean totalmente a la bombilla y que las paredes interiores de los airbags están totalmente en contacto con la bombilla. Las siguientes suposiciones se toman en cuenta a la hora de desarrollar el sistema de airbags modelado para este trabajo:

- Durante el proceso de simulación el gas considerado en el interior de los airbags responde a la ley de los gases ideales y este tiene un comportamiento adiabático.
- En el transcurso de la simulación la resistencia aerodinámica se desprecia.
- La cantidad de aire contenido en los airbags es constante.
- La presión en el interior de los airbags es constante en cada lanzamiento de simulación.

Las ecuaciones del gas en el interior del airbag son:

- $PV = mRT$
- $P = (\gamma - 1)\rho E$
- $\frac{\partial E}{E} = (1 - \gamma) \frac{\partial V}{V}$

Donde P es la presión de gas en el airbag; V es el volumen de gas contenido en el airbag; m es la masa del gas; T es la temperatura del gas; R es la constante de los gases ideales; ρ es la densidad del gas; E es la energía dentro del airbag y γ es la cantidad de calor específico.

Y las propiedades del gas empleado para el interior de los airbags son:

Peso molecular	0,002896	Kg/mol
Capacidad calorífica	29	J/°K mol

Tabla 4.0. Propiedades del gas interno de los airbags

Una vez abierto el programa Abaqus se debe establecer la carpeta de trabajo donde van a guardarse todos los datos que se vayan generando. Para ello, en el menú principal se debe ir a File/ Set Work Directory y se elegirá una carpeta previamente creada en el ordenador. A partir de aquí ya se pueden hacer todas las operaciones que se quiera y es recomendable guardar el trabajo cada poco tiempo con el objetivo de no perder trabajo hecho en caso de cierre imprevisto del programa.

4.1 Bombilla

La geometría de la bombilla led que va a ser referencia para su modelado presenta un tamaño estándar y simetría de revolución. Para evitar excesivos detalles geométricos de la bombilla real se ha simplificado las líneas y se han suprimido los contactos eléctricos en la base de la bombilla.



Ilustración 9. Bombilla de referencia para modelizar

Para el modelado de la bombilla hay dos opciones. Una es considerar la bombilla led como un sólido rígido y asignarle un material cuya densidad ficticia se obtendría dividiendo la masa de la bombilla entre el volumen del mismo obtenido a través de la función query de Abaqus. La otra opción es considerar a la bombilla como un sólido rígido, luego transformar la bombilla en hueca y por último asignarle un espesor y una propiedades físicas y mecánicas específicas que representen fielmente al objeto a modelizar. La segunda opción sería la más realista para realizar la simulación, pero se necesitaría más tiempo para el diseño y generaría más gasto computacional. La primera opción es más rápida de diseñar y bastante similar que la segunda opción a efectos de cálculo ya que lo que más interesa en estos análisis es detallar las aceleraciones que sufre el objeto cuando es protegido por un conjunto de bolsas de aire a presión (airbags). Para modelar la bombilla se hará uso del módulo PART y se creará una nueva. Se le asignará un nombre (en este caso LED), en

dimensión 3D, se elegirá que sea un sólido rígido, deformable, generado por revolución y de tamaño aproximado la unidad.

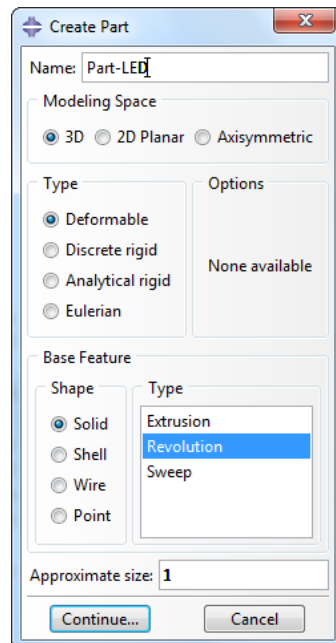


Ilustración 10. Part bombilla

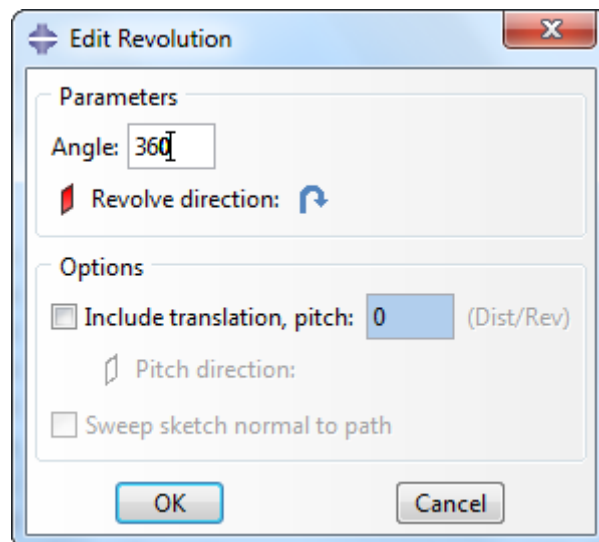


Ilustración 11. Protusión por revolución

A continuación, se dará una geometría determinada a la bombilla led sabiendo que el sólido generado va a ser por revolución y que tendrá que tener unas dimensiones acordes a una bombilla de uso común. Una vez diseñado el perfil se tendrá que indicar por cuantos grados se quiere realizar la extrusión por revolución (en este caso 360 porque es un sólido con simetría de revolución).

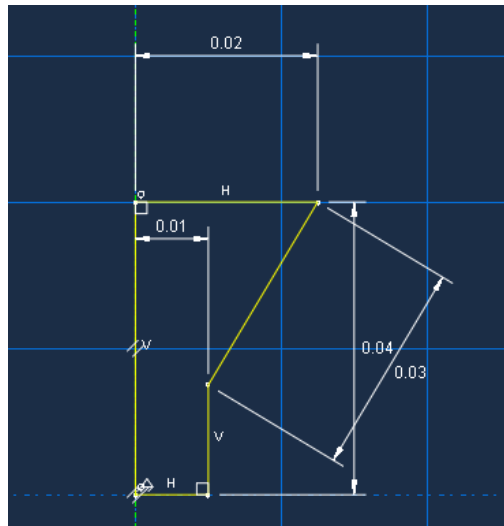


Ilustración 12. Acotado perfil bombilla

A la bombilla led habrá que asignarle un material con unas propiedades físicas y mecánicas para que la simulación sea lo más realista posible. Para ello el módulo PROPERTY da la opción de crear un material para la bombilla cuya densidad ficticia se ha obtenido de dividir la masa entre el volumen que proporciona Abaqus con la función query. Suponiendo una masa de 0.05 Kg y un volumen de 3.02E-5 proporcionado por el sistema, resulta una densidad ficticia de 1655.63Kg/m³. Al material de la bombilla se le asignará un límite elástico de 10GPa y un coeficiente de Poisson de 0.3 para asegurar que el objeto no se deforma.

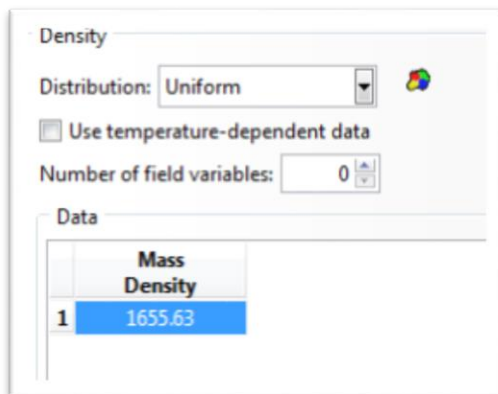


Ilustración 13. Densidad vidrio

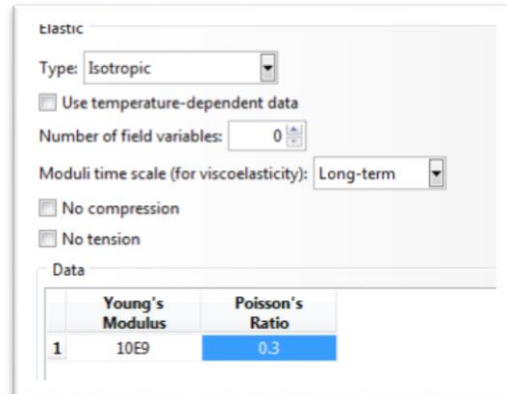


Ilustración 14. Propiedades elásticas bombilla

En los resultados se podrá observar a través de las tensiones resultantes sufridas por el objeto si los airbags son efectivos para proteger contra un impacto de las características establecidas.

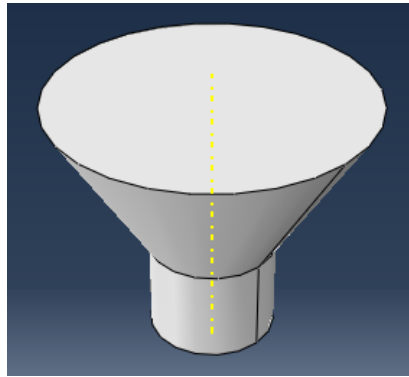


Ilustración 15. . Diseño de la bombilla Led

Seguidamente se debe crear una sección en la bombilla para poder asignar a esta el material creado anteriormente. En el módulo Property está la posibilidad de crear una nueva sección para cada parte del modelo que se esté diseñando. Esta sección para la bombilla debe ser de categoría sólida y de tipo homogénea. Una vez hecho esto el programa pedirá que se asigne un material de los creados anteriormente a esta nueva sección.

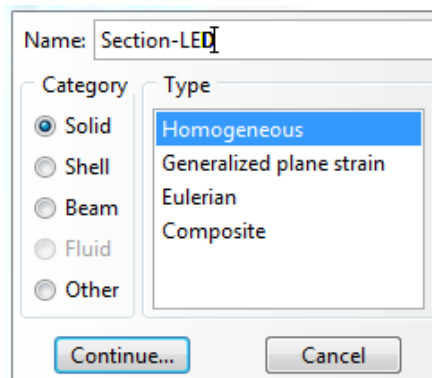


Ilustración 16. Sección exterior bombilla

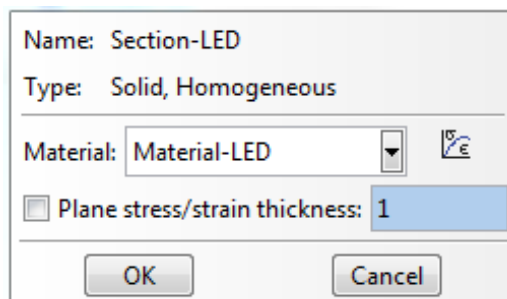


Ilustración 17. Asignado material a sección exterior

Un último paso para que el diseño de la bombilla tenga las propiedades del material que se ha creado se debe asignar la sección recién creada a la part creada con forma de bombilla y para ello se dispone de la función “Section Assignment”. La bombilla se quedará con un tono de color verde claro tras haber realizado este último paso.

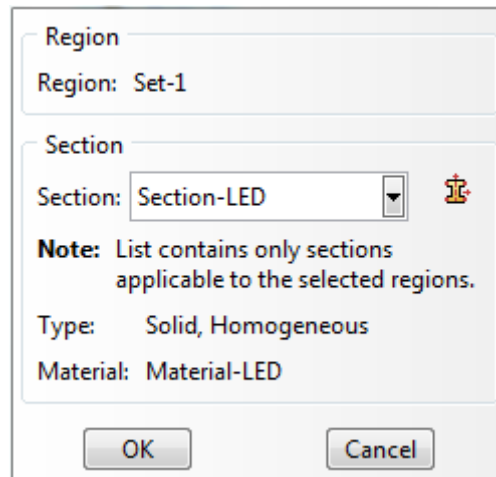


Ilustración 18. Asignado sección a part bombilla

A continuación, hay que crear una superficie externa a la bombilla que será necesaria para realizar la unión entre los airbags y la misma. Esto se hace desde el menú principal: Tools / Surface / Create. Se le da un nombre a la nueva superficie, se solicita la región donde crear la superficie (en este caso se selecciona toda la bombilla) y como es un sólido rígido no es necesario indicar que cara de la superficie se requiere, sino que se sobreentiende que solo existe una superficie que es la externa.

4.2 Los Airbags

Como el objeto a proteger en este trabajo tiene simetría de revolución, para diseñar la forma de los airbags se ha partido del perfil del objeto. En este caso una bombilla led ha sido el punto de partida para generar la forma de los airbags. Se ha considerado que los airbags estén en contacto con el objeto a lo largo de toda la geometría y que no haya aire intermedio entre el objeto y las bolsas de aire. A partir del perfil de la bombilla led se han generado los distintos perfiles de airbags que el objeto iba a tener a su alrededor. Para ello se partía del perfil de la bombilla y a partir del contorno o límites del objeto se procedía a formar el perfil de los airbags. Con esto se consigue que los distintos sólidos rígidos que se generen por revolución coincidan en los planos que más adelante servirán para hacer la unión entre ellos. Una vez definido el perfil de los airbags, estos se generarán por revolución y como sólidos rígidos. A continuación, hay que hacerlos huecos para que se puedan

simular como airbags tras asignarles un material polimérico, unas características de comportamiento de membrana y dotarles de una presión interior que haga el efecto amortiguador en la simulación de contacto. Para hacer cavidades huecas a los sólidos rígidos que se han generado por revolución se dispone de una función en Abaqus que se llama Shape-Shell-From Solid desde el menú principal.

4.3 Fluid Cavity

En ciertas aplicaciones se hace necesario predecir la respuesta mecánica de una estructura rellena de líquido o gas. Ejemplos como depósitos a presión, mecanismos neumáticos o hidráulicos y airbags de automóvil. Una dificultad primordial en llevar a cabo este tipo de aplicaciones es la relación entre la deformación de la estructura y la presión ejercida por el fluido contenido en la estructura. La respuesta de la estructura no sólo depende de las cargas externas sino también por la presión ejercida por el fluido que a su vez está afectada por cualquier deformación de la estructura. La capacidad de la superficie de la cavidad fluida proporciona el acoplamiento necesario para analizar situaciones en las que la cavidad fluida se presupone rellena un fluido cuyo estado y propiedades son constantes. En este apartado, se va a dotar al airbag de presión interna para que estos realicen la función amortiguadora durante la simulación de impacto. Para ello hay que crear una superficie interna a los airbags y para ello desde el explorador de Abaqus y en la Part Airbag /Surface/ doble click se abrirá una ventana en la que únicamente se debe dar un nombre a la superficie interior del Airbag (en este caso se la ha llamado surf_INT_Air Sup). A continuación, hay que seleccionar la región del airbag donde se quiere crear la superficie interna y, por último, hay que seleccionar que cara de la superficie se quiere considerar como superficie interna (en este caso es la cara de color morado).

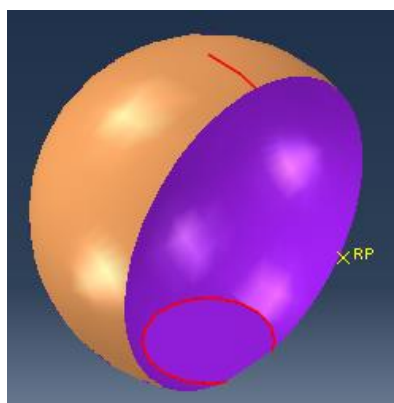


Ilustración 19. Cara interna de los airbags

Antes de rellenar los airbags de gas hay que crear el gas y dotarle a este de un conjunto de propiedades físicas. Para esto hay que ir a “Interaction Property” y hacer doble click sobre esta función para crear uno nuevo. Como cada modelo incluye bajo número de airbags, se ha optado por crear un tipo de gas y rellenarlo en cada uno de los airbags. A este gas se le ha nombrado como Fluid Cavity y sus propiedades son de tipo fluid cavity. Para finalizar este paso, la definición del gas ideal es neumática (Pneumatic) y tiene un peso molecular de 0.02896 Kg/mol y una capacidad calorífica de 28.96 J/°K mol.

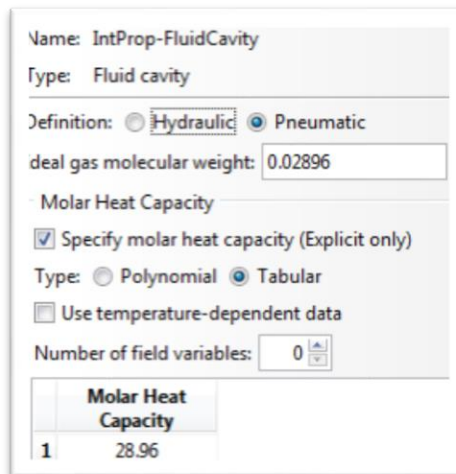


Ilustración 20. propiedades del gas interno de los airbags

Una vez creado el fluido interior de los airbags, solo falta rellenar estos, pero para eso es necesario crear un reference point en cada uno de los airbags que van a ser rellenados con el fluido creado. Se añade un Reference Point en cada PART Airbag a través del menú principal Tools-Reference Point y podrá ubicarse en cualquier lugar del airbag que se quiera. Para rellenar las cavidades de los airbags con el gas creado anteriormente se debe crear una interacción entre la superficie interna de cada airbag y el punto de referencia del mismo. Para crear esta interacción se debe ir al Explorador de Abaqus y hacer doble clic sobre “Interactions”. En la ventana que aparece se debe dar un nombre a la interacción e indicar que ésta será de tipo cavidad fluida. El siguiente paso es señalar sobre el diseño el punto de referencia correspondiente y a continuación la superficie interna del airbag. Por defecto se asocia a esta interacción el gas y sus propiedades correspondientes que han sido creadas anteriormente. Hay una dificultad en este punto a la hora de señalar la superficie interna del airbag sobre el diseño ya que a simple vista no se diferencia bien la superficie que se está eligiendo por lo que se recomienda seleccionar ésta desde la lista de superficies creadas en el botón “Select in Viewport”. En el comportamiento de la cavidad fluida, el modelo pre neumático está basado en el comportamiento de un gas ideal. El gas puede ser definido en Abaqus gracias a la enorme cantidad

de bases de datos del programa y se puede especificar la temperatura del gas o tenerlo calculado en base a la suposición de carácter adiabático.

4.4 Materiales

Hoy en día los materiales con que están fabricadas las bombillas son de muy diversos tipos de plásticos y vidrios. Aparte de los componentes metálicos fundamentales para el correcto funcionamiento, las bombillas fundamentalmente están fabricadas en plástico y vidrio. De estos dos materiales, el vidrio es un material elástico lineal, frágil y más restrictivo considerando el comportamiento mecánico ante colisiones e impactos. Por eso se ha escogido un material con características similares al vidrio para representar el sólido rígido en forma de bombilla led.

Densidad	1655,63	Kg/m ³
Módulo de elasticidad	10.000	MPa
Coefficiente de Poisson	0,3	MPa

Tabla 4.4.1. Propiedades del material para la bombilla

Se crea un material nuevo para los airbags. Este podría ser de varios tipos; desde polimérico hasta de tela. En este caso se ha decidido optar por que los airbags estuvieran fabricados de polietileno por su comportamiento mecánico elasto-plástico. El polietileno en forma de membrana es un material elasto-plástico que se comporta muy bien frente a esfuerzos de cortadura por eso cuando la presión del gas contenido dentro de los airbags aumenta, el material soporta estos esfuerzos sin dificultad. Se considera que el material empleado para representar a los airbags tiene unas propiedades elásticas lineales hasta alcanzar su límite elástico y éste no va a llegar a superarse en ninguno de los experimentos desarrollados en este trabajo.

Densidad	970	Kg/m ³
Módulo de elasticidad	2.700	MPa
Coefficiente de Poisson	0,45	NA
Límite plástico	25	MPa
Endurecimiento por deformación	45	MPa

Tabla 4.4.2. propiedades del polietileno

Las ecuaciones de comportamiento mecánico que gobiernan el material de polietileno son las siguientes:

Antes de alcanzar su límite elástico (25 MPa) el material se comporta de manera lineal y la relación entre tensiones y deformaciones es su módulo de Young ($E= 2,7$ GPa) a través de las ecuaciones de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

En el caso que las tensiones soportadas por el material polietileno superen el límite elástico, el material del airbag empieza a plastificar y las relaciones entre tensiones y deformaciones se rigen por las ecuaciones de Prant-Reus:

$$\left. \begin{aligned} \partial \varepsilon_{ij}^H &= \frac{-1}{3K} \partial p = \frac{1}{3K} \partial \sigma_{ij}^H \\ \partial e_{ij} &= \frac{1}{2G} \partial S_{ij} + \frac{\partial \bar{\varepsilon}^p}{\frac{2}{3}q} S_{ij} \end{aligned} \right\} \partial \varepsilon_{ij} = \partial e_{ij} + \partial \varepsilon_{ij}^H$$

Siendo; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ y $q = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} : S_{ij}}$

Y para un material elasto-plástico la ley de endurecimiento por deformación en función de las deformaciones relaciona el límite elástico con la deformación plástica equivalente a través de:

$$\sigma_y = H(\bar{\varepsilon}^p)$$

Para dar comportamiento de membrana a los airbags se necesita, aparte de crear el material polietileno, crear una sección tipo membrana con un espesor de entre 1mm y 0,1mm. Y por último se asignará esta nueva sección a cada una de las part airbag que se hayan creado para el modelo.

4.5 Mallado

El mallado de los componentes del modelo han sido primeramente elementales para obtener unos resultados del análisis que indicaran el orden de magnitud y que el tiempo de cálculo de resultados

no fuera excesivo. Se sabe que el tamaño de malla es inversamente proporcional al tiempo de procesamiento del software y directamente proporcional a la precisión de los resultados obtenidos. En los modelos desarrollados hay bajo número de airbags por lo que el mallado se ha realizado individualmente, pero con los mismos patrones para todos. Lo primero es elegir el tipo de elemento en que va a ser subdividido el airbag. Para ello hay que ir en el menú principal a Mesh/ Mesh Controls. En este caso hemos elegido la forma predominantemente cuadrada y si alguna superficie no cuadra con elementos cuadrados entonces el sistema elegirá para esas zonas elementos de tipo triangular.

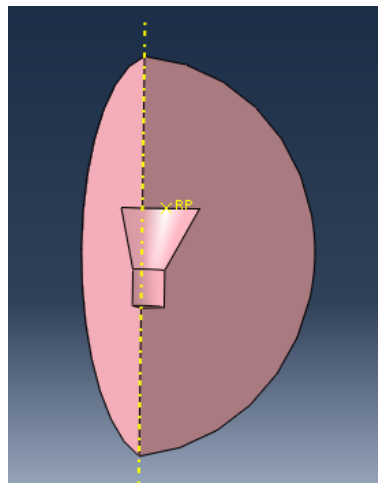


Ilustración 21. Geometría del airbag

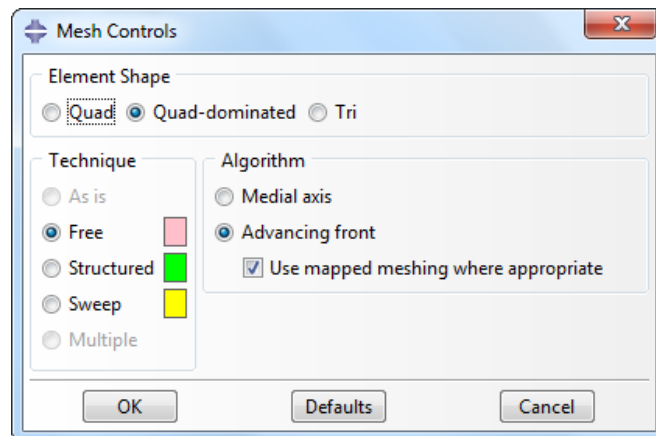


Ilustración 22. Elección de forma de los elementos MEF

A continuación, se elige el tipo de elemento en que va a ser subdividido la geometría del airbag. Para ello hay que ir al menú principal Mesh/ Element Type y tras seleccionar la zona del airbag en la que se quiere trabajar (en este caso todo el airbag) se abrirá una ventana donde únicamente hay que elegir el tipo de elemento de la librería Explicit y que la familia sea elementos tipo membrana.

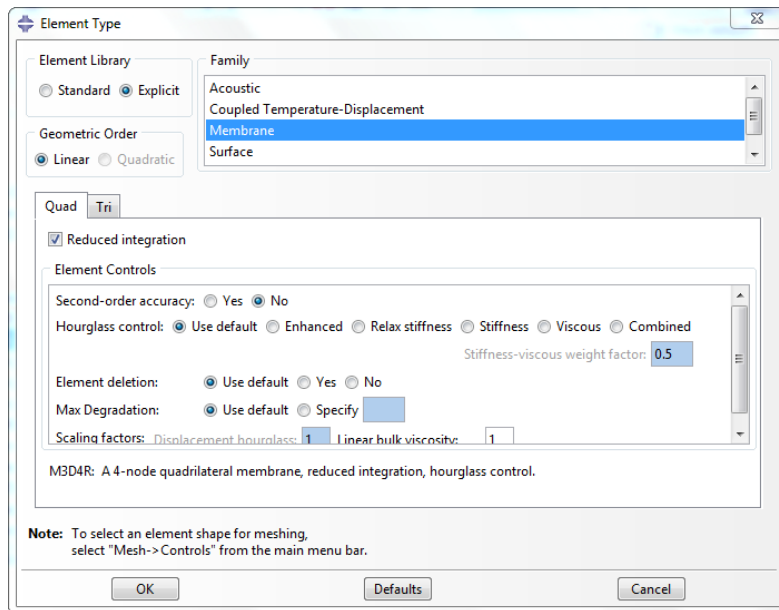


Ilustración 23. Tipo de elementos para airbags

Una vez hecho esto hay que sembrar al airbag de nodos con el objetivo de dar un tamaño de elementos, distancia entre nodos o en definitiva un tamaño de malla. Para ello hay que ir al menú principal Seed/ seed part y automáticamente el programa te ofrece un tamaño de malla aleatorio conforme a la geometría y que se puede variar para que el análisis de sensibilidad de la malla sea correcto. En este caso se ha elegido una distancia entre nodos de 0,01mm.

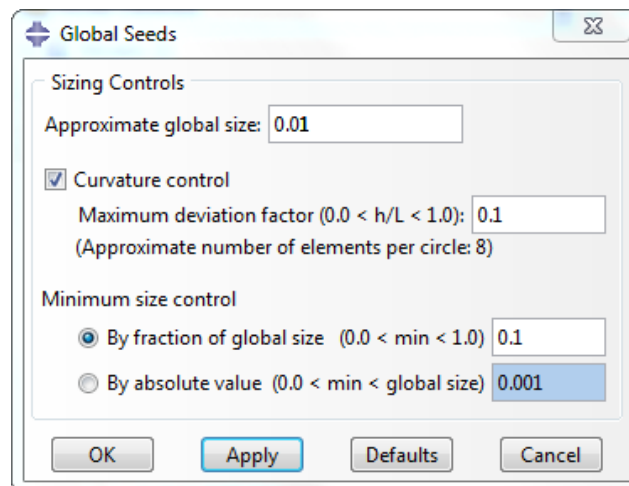


Ilustración 24. Elección para el tamaño de malla

Esto no quiere decir que haya partes de la geometría del airbag cuya distancia entre nodos sea menor a consecuencia de la irregularidad de la geometría del airbag y de la siembra automática de nodos a lo largo de la superficie del airbag. Por este motivo hay que tomar especial atención al archivo. sta del programa Abaqus donde se puede identificar la menor distancia que existe entre nodos de cada

modelo para cumplir la condición de modelos Explícitos de Courant. Por último, hay que dar la orden de mallar la Part Airbag y para ello hay que ir al menú principal Mesh/ Part donde únicamente habrá que confirmar el mallado del airbag y asignar a este todas las propiedades de mallado que se han elegido con anterioridad.

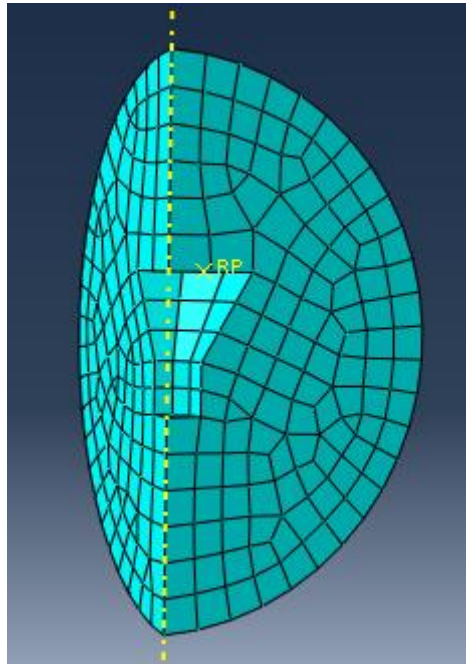


Ilustración 25. Airbag mallado

4.6 Uniones

En los modelos desarrollados en este estudio hay dos uniones características. Una de las uniones se da entre los airbags que rodean y protegen al objeto y las otras uniones se dan entre la bombilla led y los propios airbags. Estas dos uniones características son del mismo tipo y para que se pueda aplicar este tipo de unión se deben crear anteriormente unas superficies exteriores a todos y cada uno de los airbags e incluso a la propia bombilla led. En este momento surgen dos posibilidades de diseño, la primera implica que entre airbags va a existir una superficie de contacto con lo que por cada airbag habrá una superficie para unir con el objeto a proteger y otra/s que se destinen para la unión entre airbags adyacentes. La segunda posibilidad de diseño de airbag implica que no hay unión entre airbags adyacentes con lo cual solo existe unión entre el airbag y la bombilla led. El proceso de unión entre dos superficies es el mismo a pesar de las posibilidades anteriores. En el caso que el diseño implique la unión entre airbags adyacentes significará que habrá que crear más superficies externas por cada airbag y la consecuente identificación inequívoca. Una vez creadas todas las superficies externas e identificadas apropiadamente habrá que ir a Constraints, hacer doble click para crear una nueva Constraint o unión y se comenzaría con nombrar a la unión y elegir el

tipo Tie. Este tipo de uniones requiere elegir una superficie maestra y la otra esclava. Tras elegir el tipo superficie para la región maestra será necesario indicar que superficie del diseño se va a elegir para la unión y una vez hecho esto se pedirá lo mismo para la superficie esclava.

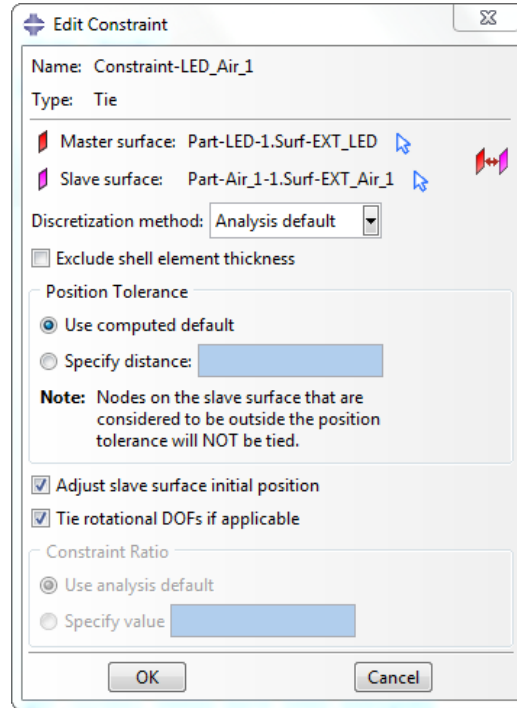


Ilustración 26. Unión rígida entre bombilla y airbag

A la hora de indicar que superficie (maestra y esclava) de diseño se elige para cada unión existe la posibilidad tanto de elegir de una lista de superficies creadas anteriormente como de visualizar la superficie elegida para la unión con el propósito de no confundirse a la hora de concretar la unión.

4.7 Model Attributes

En este apartado solo se va a especificar un par de condiciones de contorno necesarias para que el sistema entienda que no debe atender a cambios de temperatura debido a la colisión. La primera condición de contorno es la temperatura ambiente y se especificara con 0 °C ó -273,16 °K y la segunda condición de contorno es la constante universal de los gases que tiene como valor 8,3144 J/mol*°K.

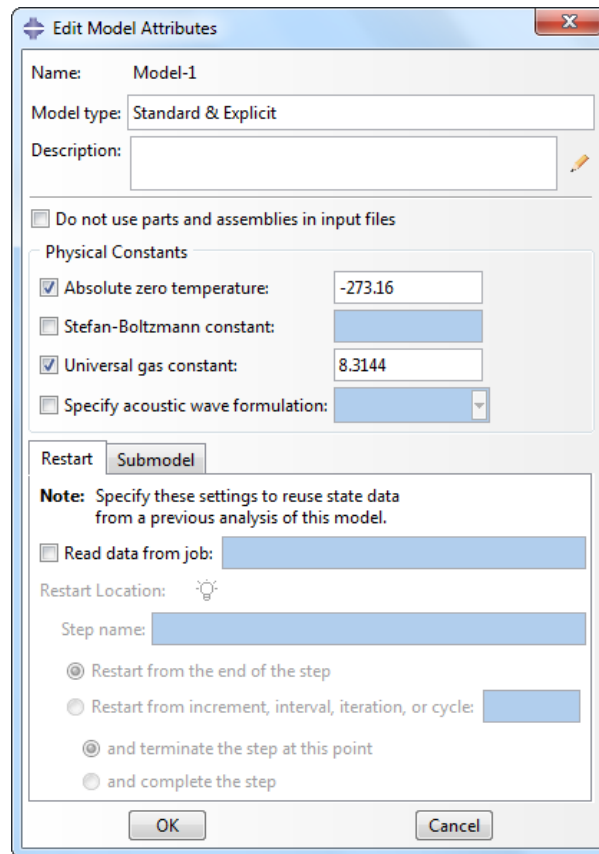


Ilustración 27. Propiedades de aire exterior

4.8 Suelo y Contacto

El objetivo final de este trabajo es hacer un estudio de las aceleraciones generadas en una bombilla led protegida por un grupo de airbags y que impacta contra una superficie rígida indeformable. Para representar la superficie de impacto se han escogido una serie de consideraciones. La primera ha sido considerar la superficie suelo con unas dimensiones mucho mayores que el sistema sometido a estudio ya que como la bombilla no es totalmente simétrica presenta momentos de inercia en el eje “y” y por tanto fácilmente genere giros tras el primer impacto y consecuentemente el sistema se vaya desplazando tras los rebotes sucesivos. Por este motivo se hace una superficie suficientemente grande para que el sistema no tenga la posibilidad de salirse fuera del entorno de trabajo. La segunda consideración es que la superficie de contacto suelo es infinitamente rígida con lo cual no hace falta asignar un material susceptible de deformación. La última consideración es que se le han restringido sus seis grados de libertad (tres traslaciones en las direcciones principales y tres posibles giros en sus direcciones principales correspondientes) a través de unas condiciones de contorno o de ligadura.

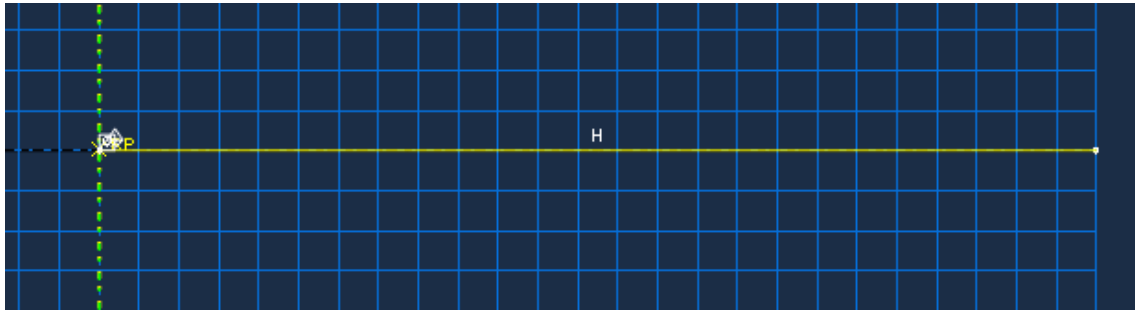


Ilustración 28. Sección superficie de impacto

Para diseñar la geometría de la superficie de impacto se ha creado una Part llamada suelo, en tres dimensiones, de tipo “Analytical rigid” y generada por revolución. El tamaño aproximado que se le ha proporcionado ha sido la unidad. Se ha generado una línea de 5 metros desde el origen de coordenadas y por revolución se genera una superficie circular. A partir de esta Part suelo se va a crear su instancia correspondiente y como se ha creado en el origen de coordenadas es necesario desplazar a lo largo del eje “Y” hasta que quede a pocos centímetros del sistema bombilla protegida por airbags. A la Part suelo se le debe añadir un Reference Point al que poder asignar unas condiciones de contorno o de ligadura. Un Reference Point es un punto que se puede situar en cualquier lugar de la Part y todo lo que se le asigne a este punto se cumplirá al mismo tiempo en toda la Part a la que pertenece ese “Reference Point”. Para crear este punto hay que ir al menú principal / Tools / Reference Point y situarlo donde más convenga. Una vez situado el punto en cuestión, hay que ir a Step / Initial /Boundary Conditions (BC) y crear una nueva condición de ligadura. En esta se le asignará un nombre, será de categoría mecánica y de tipo desplazamiento/rotación.

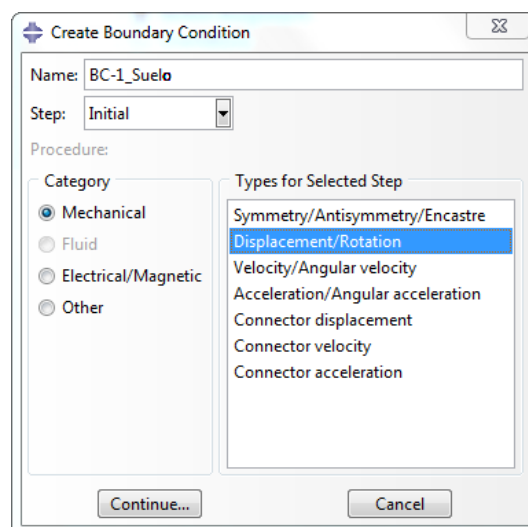


Ilustración 29. Condiciones de contorno para superficie de impacto

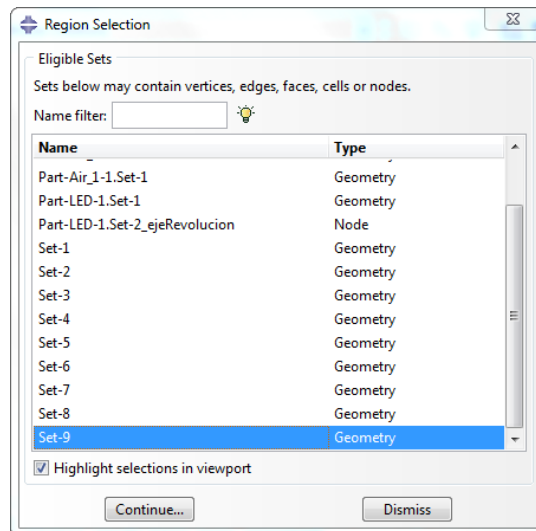


Ilustración 30. Localización condiciones de contorno

A continuación, se debe indicar en qué punto o zona de la geometría se quiere aplicar las condiciones de contorno. En este caso se deben aplicar al Reference Point creado en la Part suelo y finalmente hay que indicar que grados de libertad se quiere restringir. En este caso se restringirán todos los grados de libertad (traslaciones y rotaciones en las tres direcciones principales) porque el suelo no se debe mover bajo ningún concepto.

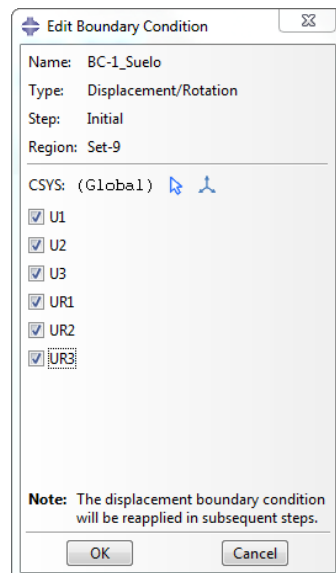


Ilustración 31. Restricción de movimientos en superficie de impacto

Es necesario también crear una superficie externa a la Part suelo ya que se va a provocar un impacto entre el sistema de airbags y la superficie de impacto suelo. Para ello desde la Part suelo en el explorador se despliegan las opciones y hay una que pone surfaces. Se hará doble click sobre

“surfaces”, se le asignara un nombre, habrá que indicar la zona de la part suelo donde se quiera generar la superficie y por último hay que elegir el color de la superficie que se va a considerar (marrón o morado) según se quiera considerar la cara externa o interna de la superficie. En este caso se quiere trabajar con la cara externa de la superficie por lo que se elegirá el color marrón.

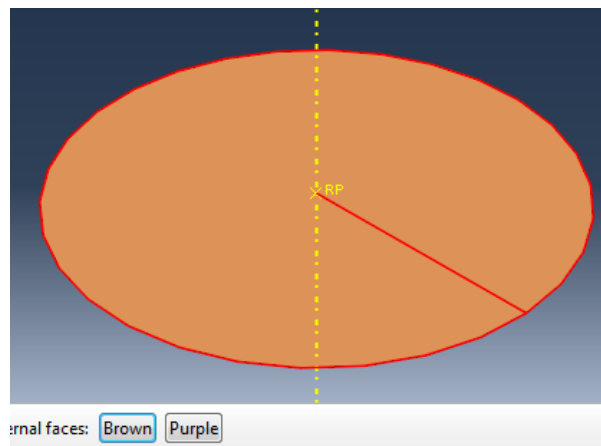


Ilustración 32. Elección cara de superficie de impacto

Para el impacto entre el sistema y la superficie de contacto va a ser necesario generar un tipo de contacto transitorio en el que se producirán una serie de intercambios de energía debido al rozamiento entre superficies. El contacto se va a producir entre el conjunto sistema (bombilla led y airbags) y la superficie de impacto suelo. Para el conjunto sistema hay que crear una superficie nueva que englobe todo el conjunto o mejor dicho las caras externas de todos los elementos que componen el sistema conjunto. A esta nueva superficie se la denominará “Element Based” y para crearla hay que ir al menú principal / Tools / Surface / Create. Para generar el impacto transitorio hay que crear primero las propiedades del contacto y para lo cual habrá que dirigirse en el explorador de Abaqus hasta el módulo “Interactions Properties” / Create donde se proporcionará un nombre a las propiedades del contacto transitorio y se elegirá el tipo de interacción: Contact. Una vez hecho esto hay que darle al contacto unas propiedades mecánicas en sentido normal a la superficie y en sentido tangencial a la misma. Para el sentido normal a la superficie basta con indicar “Hard Contact” para el sobre cierre de presión y restringir el método de ejecución por defecto.

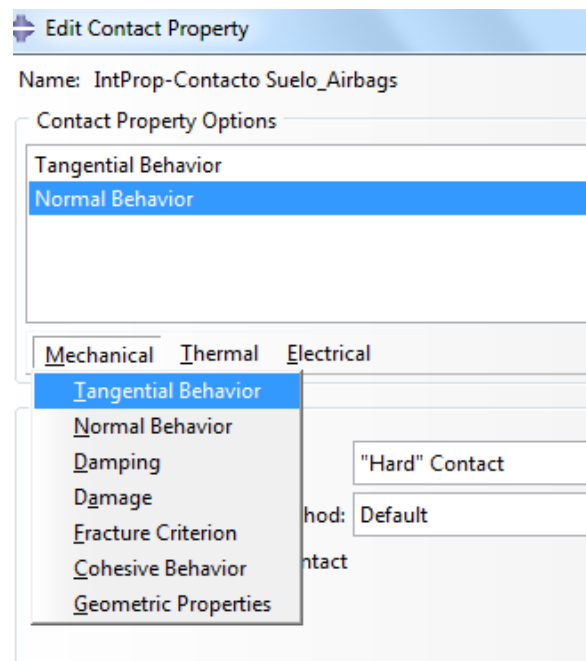


Ilustración 33. Comportamiento en dirección normal de la superficie suelo

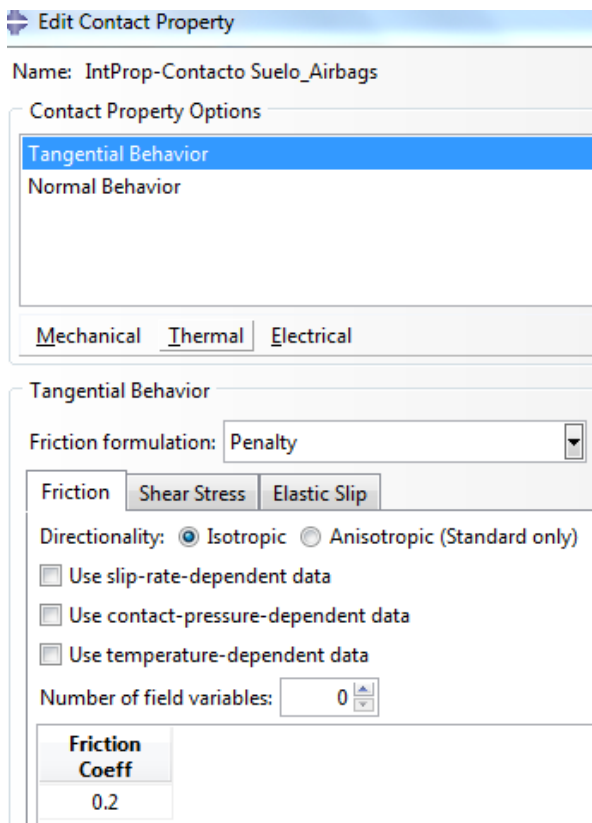


Ilustración 34. Comportamiento tangencial de la superficie suelo

En cuanto al comportamiento mecánico de la superficie en sentido tangencial se debe indicar un tipo de fricción “Penalty” y un coeficiente de fricción de 0,2. Este comportamiento proporcionado a las propiedades del contacto son necesarias para que el sistema libere parte de su energía cinética al ponerse en contacto las dos superficies implicadas en el impacto. Por último, hay que crear un contacto entre las superficies anteriormente mencionadas con las propiedades que se acaban de establecer. Desde el explorador de módulos de Abaqus habrá que ir a módulo Step / Initial / Interactions / Create, se asignará un nombre al contacto y se definirá su tipo como: General contact (Explicit)

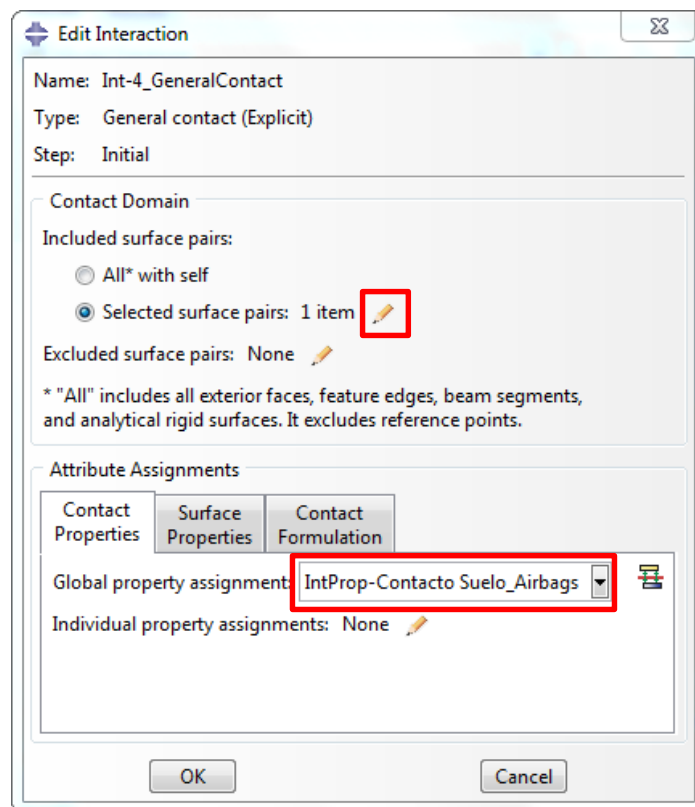


Ilustración 35. Elección de pareja de superficies y propiedades de contacto

A continuación, hay que seleccionar la pareja de superficies que van a participar del contacto transitorio; una es la recientemente creada “Element Based” que engloba todos los airbags y la bombilla led y la otra es el suelo. Es importante mantener la jerarquía de superficie maestra para el conjunto de airbags y la superficie suelo como esclava. Por último, a este nuevo contacto transitorio se le asigna las propiedades de contacto creadas anteriormente a través de la función asignación de propiedades globales (remarcado en rojo).

4.9 Velocidad

Para establecer una velocidad de impacto para el sistema se ha considerado varias situaciones posibles pero la más común sería la caída de una bombilla desde su emplazamiento habitual. Pueden existir distintas situaciones cotidianas que representen la ubicación habitual de una bombilla, pero de estas la más crítica se podría decir que es la caída de una bombilla desde el techo de una vivienda. Por ello se ha establecido la distancia entre el suelo y el techo como longitud recorrida por la bombilla en caída libre para determinar una velocidad característica. A través de las ecuaciones de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA) se puede obtener dicha velocidad característica.

$$X_f = X_0 + V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad \text{Ec.1}$$

Donde $X_0 = 0$; $V_0 = 0$ y $a = g$ (*aceleración gravitatoria*). De la ecuación 1 despejamos el tiempo de caída y resulta.

$$t = \sqrt{\frac{2 \times X_f}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 3,5}{9,81}} = 0,844 \text{ seg}$$

Ahora podemos obtener la velocidad de caída de la bombilla

$$V_f = V_0 + g t = 0 + 9,81 \times 0,844 = 8,3 \text{ m/s} \quad \text{Ec.2}$$

Al sistema conjunto bombilla y airbags se le va a proporcionar la velocidad calculada anteriormente y para ello se debe ir al explorador de Abaqus y en el módulo Step / Initial / Predefined Fields / Create habrá que proporcionar un nombre, de categoría mecánica y de tipo velocidad.

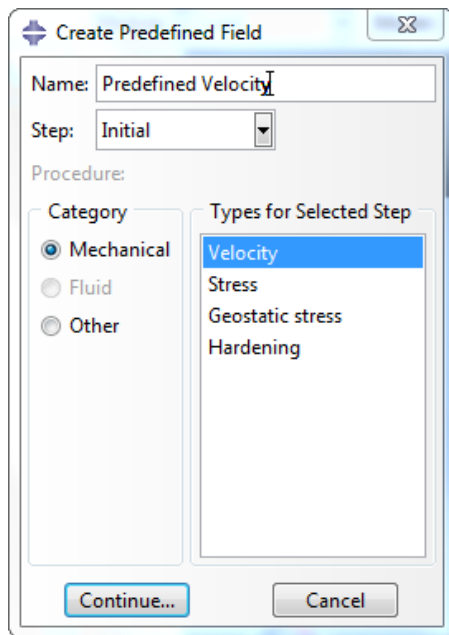


Ilustración 36. Asignación de velocidad

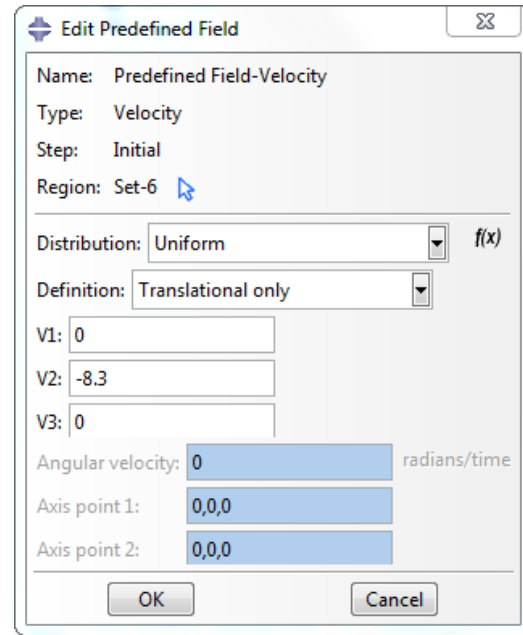


Ilustración 37. Módulo y dirección de velocidad

Primeramente, será necesario seleccionar a que elementos del sistema conjunto se les va a asignar velocidad (en este caso se va a elegir todo el sistema conjunto) y seguidamente será necesario determinar si se va a proporcionar velocidad o velocidad y rotación. En el caso a analizar sólo se quiere que el sistema simule una caída vertical por lo que se definirá traslación únicamente y será necesario indicar el módulo de la velocidad y el sentido del vector velocidad (módulo: 8,3 y sentido negativo porque es una caída).

4.10 Steps

Uno de los últimos pasos comunes a todas las simulaciones de los modelos es generar el Step necesario para generar el movimiento de impacto entre el sistema conjunto de airbags y la superficie suelo. Un análisis dinámico explícito es práctico para un gran número de modelos con respuestas dinámicas transitorias y para el análisis de procesos extremadamente discontinuos. El procedimiento de la dinámica explícita realiza eficientemente un gran número de pequeños incrementos. El operador de diferencia central explícito satisface las ecuaciones de equilibrio dinámico al principio del incremento, t ; las aceleraciones calculadas en el tiempo t se utilizan para avanzar en la solución de velocidad a tiempo $t+\Delta t/2$ y la solución de desplazamiento al tiempo $t+\Delta t$. El procedimiento de análisis de dinámica explícita se basa en la aplicación de una regla de integración explícita junto con el uso de matrices masa diagonal elemento ("agrupan"). Las ecuaciones de movimiento para el cuerpo se integran usando la regla de integración central

diferencia explícita. Para generar el Step Expicit hay que ir al explorador de Abaqus /Step/ Create (o doble click sobre Step). Como ya se han creado diferentes cosas en el Step Initial hay que fijarse que el este nuevo Step se desarrolle después del Step Initial. Este segundo Step es de tipo Dynamic, Explicit únicamente. A continuación, solo hay que indicar que periodo de tiempo se da al Step Explicit para actuar, es decir, que tiempo se estima que se produzca el impacto. Si se sabe que la distancia entre los cuerpos es 0,01m y la velocidad del sistema conjunto es 8,3 m/s; entonces el tiempo necesario para el impacto son 0,0012 segundos. Por lo tanto, con dar 0,0024 segundos al Step Explicit bastará como tiempo de simulación para obtener resultados objetivos.

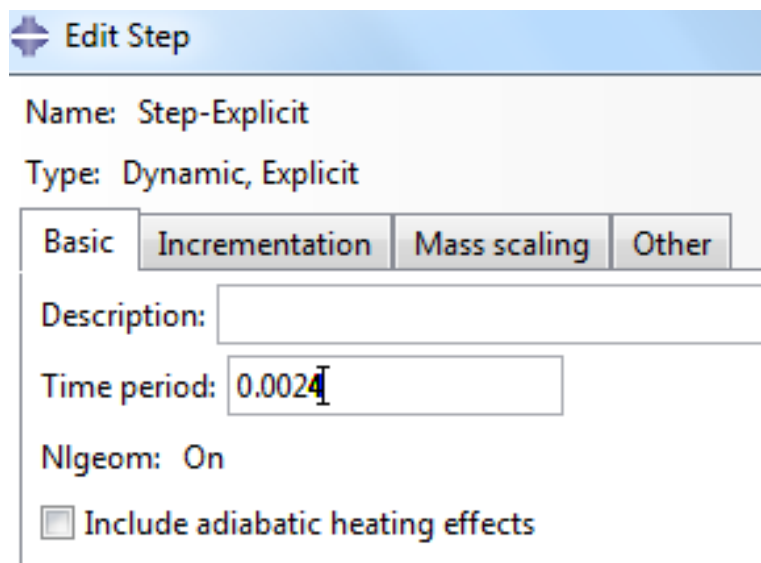


Ilustración 38. Tiempo mínimo de simulación para impacto

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una parte importante de este estudio consiste en realizar un análisis de sensibilidad de malla. La aplicación de modelos matemáticos sofisticados y de software especializado a la solución de problemas de ingeniería es una práctica común en los últimos tiempos, sobre todo en los países industrializados. Estos modelos y su correspondiente software especializado hacen posible en la actualidad el estudio detallado de problemas de ingeniería que antes eran inmanejables debido a la complejidad de los fenómenos físicos que suceden a diario. Estas herramientas permiten analizar una gran variedad de fenómenos físicos de una manera rápida y eficiente. Estas herramientas de software están preparadas para ofrecer unos resultados bastante precisos y por ende necesitan realizar enormes cantidades de cálculos matemáticos. La cantidad de cálculos que el software de análisis tiene que realizar es directamente proporcional a tiempo que necesita la computadora para obtener los resultados de cálculo. Consecuentemente según las circunstancias laborales los procesos de cálculo exigirán más o menos tiempo de desarrollo de cálculo. En las herramientas de análisis por ordenador que se basan en el método de los elementos finitos es fundamental discretizar el objeto de análisis en elementos más sencillos a través de un mallado. El tamaño de malla va a determinar la precisión de los resultados obtenidos y el tiempo empleado por la herramienta de software para realizar los cálculos que se le han solicitado. Es por ello la importancia de dedicar un tiempo de la investigación para hacer un análisis de sensibilidad de mallado. A partir del análisis de sensibilidad de la malla se obtiene un tamaño de malla óptimo para el cual los resultados ya ofrecen una precisión muy aceptable del cálculo requerido.

Actualmente las empresas requieren que los empleados resuelvan problemas tan pronto como sea posible con lo que el tiempo que los empleados de las empresas disponen para obtener resultados es bastante ajustado. Esto quiere decir que por mucho que se divida el objeto en elementos más sencillos con el objetivo de trabajar con una malla más precisa no se van a obtener unos resultados más precisos. Con lo cual si se trabaja en el análisis con un tamaño de malla óptimo los resultados estarán dentro de lo requerido como aceptable y el tiempo de cálculo por parte del software será el mínimo posible.

La simulación representa la caída de una bombilla led contra el suelo. La bombilla está rodeada por un conjunto de airbags que tienen la función de amortiguar el impacto entre esta y el suelo. Los airbags están rellenos de un gas a presión y estos tienen la misión de disminuir las fuerzas soportadas por la bombilla a fin de que se asegure la integridad de la misma. Las condiciones generales de contorno son la velocidad inicial constante a consecuencia de la altura desde donde se ha supuesto cae la bombilla, la no consideración de la gravedad en este ejercicio porque uno de los objetivos primordiales es el análisis de las aceleraciones sufridas por el objeto en el instante de tiempo que se produce el impacto de este contra el suelo y las condiciones adiabáticas del entorno. Al no considerar la gravedad en este ejercicio, sólo va a ser reflejado un impacto entre el sistema y el suelo ya que la gravedad provocaría la atracción continuada hacia el suelo una vez las fuerzas de inercia fueran menores que la fuerza gravitatoria. Si se considerara la fuerza de la gravedad se podía ver reflejado en el comportamiento del sistema en forma de varios impactos sucesivos ya que los airbags provocan, además del efecto amortiguamiento, un rebote en sentido contrario a la dirección de caída y por causa de la gravedad volvería a cambiar de sentido al sistema generando un nuevo impacto hasta que el sistema de desacelere por completo.

Las variables de esta simulación que va a tener un efecto directo sobre el comportamiento dinámico de la bombilla son: la velocidad inicial constante, la presión interna de los airbags, el tamaño de los airbags y el espesor que tenga la membrana asociada al material de los airbags. Los efectos que se van a producir por causa de estas variables van a ser: las variaciones de energía del sistema, las aceleraciones sufridas por la bombilla, las tensiones y deformaciones generadas en el sistema conjunto de airbags. Para lanzar las distintas simulaciones previamente han de establecerse unos parámetros comunes a todos los modelos y otras más específicas para cada uno de los mismos. Básicamente, justo antes de lanzar la simulación hay que preparar tres apartados del programa para que este proporcione los resultados requeridos. Estos son: el periodo de tiempo que va a durar la simulación, los resultados de campos vectoriales (Field Output) y los resultados de análisis de variables frente al tiempo (History Output). El tiempo que va a durar la simulación se especifica dentro del explorador de Abaqus, en el módulo Step-Explicit y se calcula dependiendo de las condiciones de velocidad y espacio que haya entre los cuerpos involucrados en el impacto. Es importante ajustar bien el tiempo de simulación para no hacer trabajar al programa en exceso. En los modelos analizados en este trabajo la velocidad es de 8,3 m/s y la distancia media entre los dos cuerpos es de 10 cm, entonces una centésima de segundo bastaría para que sucediera el impacto.

Como también se quiere observar que sucede con el sistema un tiempo después, se establece un tiempo de simulación de entre 3 y 5 centésimas de segundo.

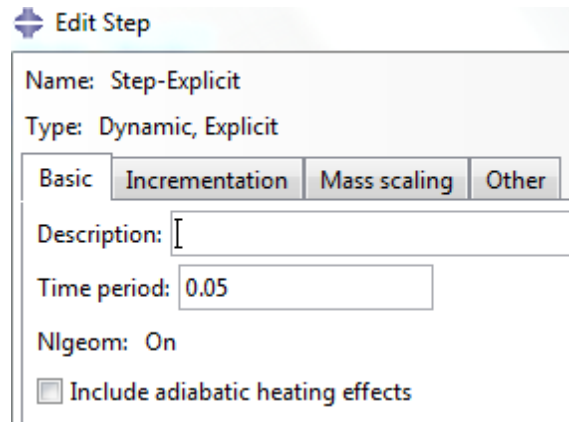


Ilustración 39. Tiempo de simulación

Para obtener resultados de campos vectoriales o resultados globales se utiliza la herramienta Field Output. Esta herramienta puede proporcionar multitud de variables determinantes para el análisis de los modelos de este trabajo. Esta herramienta está preparada para ofrecer resultados tanto para todo el modelo (objeto a proteger y airbags que lo rodean) como para un conjunto de nodos o elementos. Como hay resultados que se quieren analizar para todo el sistema conjunto o modelo, se va a dejar esta herramienta para que proporcione resultados de tensiones equivalentes de Von Misses, deformaciones máximas, deformaciones plásticas equivalentes y desplazamientos.

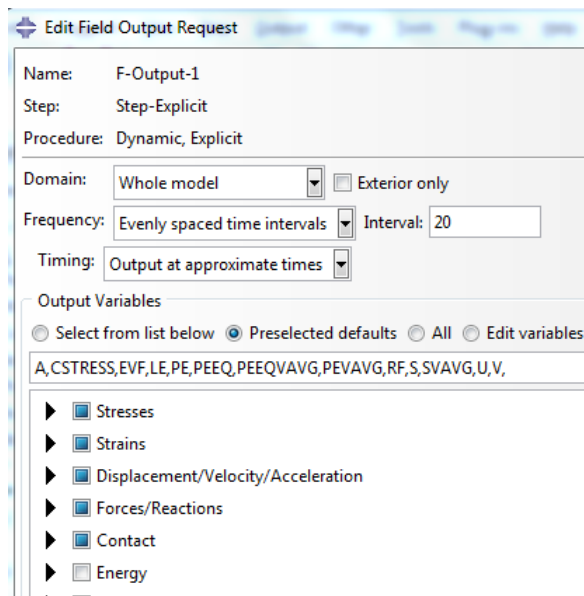


Ilustración 40. Frecuencia de resultados

Para obtener el resultado de diferentes variables frente al tiempo se dispone de la herramienta “History Output”. Esta se puede ajustar desde el explorador de Abaqus, en el módulo Step-Explicit. Como uno de los objetivos principales de este trabajo es hacer un estudio de las aceleraciones que sufre la bombilla durante el instante de tiempo que dura el impacto contra el suelo, no hace falta obtener las aceleraciones de todo el sólido rígido que representa la bombilla. Basta con crear un conjunto de elementos representativos de la bombilla y que estén dispuestos a lo largo de su eje de revolución. La variable que se va a utilizar como medida de las aceleraciones del sólido rígido va a ser ACOM. Esta variable representa la media del valor de aceleración longitudinal y rotacional en cada nodo del objeto a proteger. Esta variable puede subdividirse en tres (ACOM 1, ACOM 2 y ACOM 3) cada una de las cuales representa la media de aceleraciones en las direcciones principales X, Y, Z. La variable que se va a considerar para medir las tensiones generadas en el sistema va a ser la tensión equivalente de Von Misses “S” y la variable para medir las deformaciones va a ser “LE”.

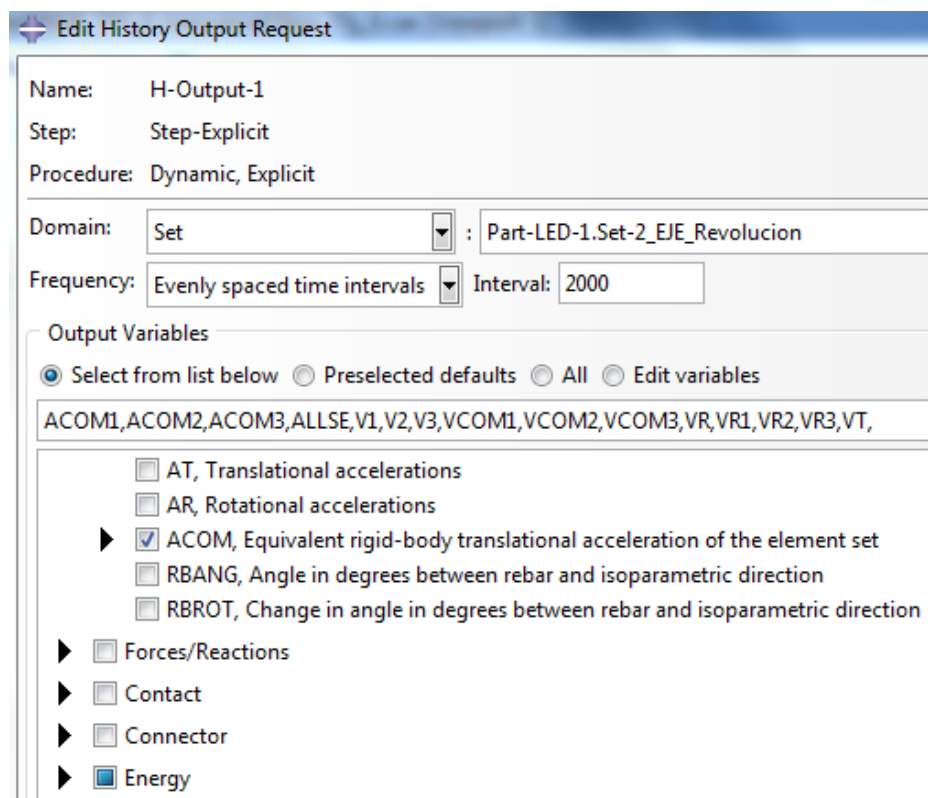


Ilustración 41. Elección de variables para representar frente al tiempo

5.1 Primera tipología considerada

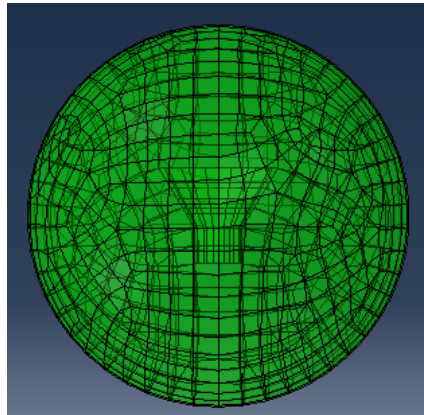


Ilustración 42. Diseño del primer modelo

5.1.1 Modelado con 0,1mm de espesor de membrana

En el primer modelo, como el objeto a proteger es una bombilla led cuya geometría tiene simetría de revolución, el diseño de los airbags ha tenido que seguir esa propiedad del objeto con el propósito de cubrir totalmente el contorno exterior de la bombilla. A partir del diseño de uno de los airbags se ha podido generar los demás gracias a la función “Radial Pattern” del módulo Assembly. Primeramente, se ha creado el perfil del primer airbag y por revolución de 90 grados se generado el volumen del mismo. Con la función “Radial Pattern” se han generado los otros tres airbags más hasta cubrir el contorno exterior de la bombilla. Para crear el interior del primer airbag se ha necesitado el perfil de la bombilla y a partir de ahí se ha generado una semicircunferencia para dar el contorno exterior al airbag. De esta manera cada uno de los cuatro airbags generados para este modelo tiene una cara exterior, dos caras laterales en contacto con los airbags adyacentes y una cara interna con la forma de un cuarto de la bombilla led. Esta estructura se la podría asemejar geométricamente a los gajos de una naranja. La distancia a la que se ha situado el sistema con respecto al suelo son 20 centímetros. Si se considera que el sistema se traslada a una velocidad de 8,3 m/s resulta como tiempo hasta el impacto de 0,025 segundos. Por este motivo se ha establecido un periodo de tiempo para la simulación de 0,05 segundos; tiempo suficiente para que el sistema alcance la superficie suelo y vuelva a la altura desde que se lanzó.

5.1.2 Simulación

Las tres imágenes que se muestran a continuación representan los instantes involucrados en la colisión. Para la visualización de las imágenes se ha optado por un tipo de representación (Contour Type “Isosurface”) que, sin dejar de ver la geometría total del sistema, oculta los valores de las variables analizadas con menor relevancia y resalta con una gama de colores los máximos valores o de mayor relevancia. La primera figura muestra las tensiones generadas en el sistema un instante antes de la colisión y como se puede comprobar las tensiones máximas están localizadas a lo largo de todo el contorno de los airbags. Esto puede ser debido a que la presión interna de los airbags esté ejerciendo una presión sobre las membranas de los airbags que protegen la bombilla.

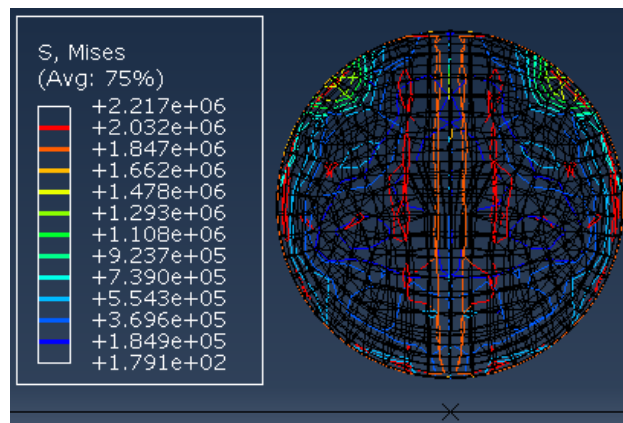


Ilustración 43. Después de 0,0157 segundos del lanzamiento

Esta segunda imagen representa el instante de la colisión entre el sistema y el suelo. Ahora las tensiones máximas se localizan en la parte inferior del sistema donde se está produciendo la colisión. Como se puede comprobar respecto a la primera imagen, hay un salto leve de un orden de magnitud en las tensiones máximas. En esta imagen se observa como las tensiones máximas se concentran en la zona de impacto y como estas se van atenuando a medida que se separan del punto de impacto. También se observa como la zona más alejada del impacto sigue sufriendo altas tensiones como consecuencia de la presión interna y del aumento de presión a causa de la disminución de volumen provocado por la deformación del sistema. En esta imagen se puede ver qué zona del sistema sufre deformación y qué proporción del sistema se desplaza como consecuencia de las deformaciones.

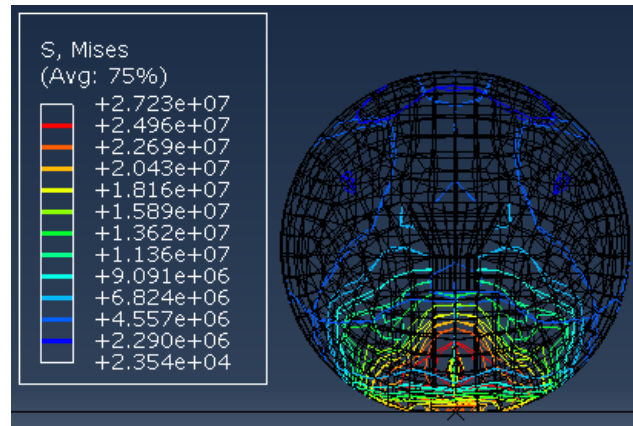


Ilustración 44. Después de 0,0175 segundos del lanzamiento

La tercera imagen representa un instante después de la colisión y se puede comprobar porque el sistema está despegado de la superficie de impacto representada por la X inferior. En esta figura se ve como a pesar que el sistema ya se ha despegado del suelo, las tensiones máximas se mantienen en la zona de impacto y con casi la misma intensidad. También se observa como la presión interna de los airbags sigue provocando un esfuerzo en las membranas de los mismos.

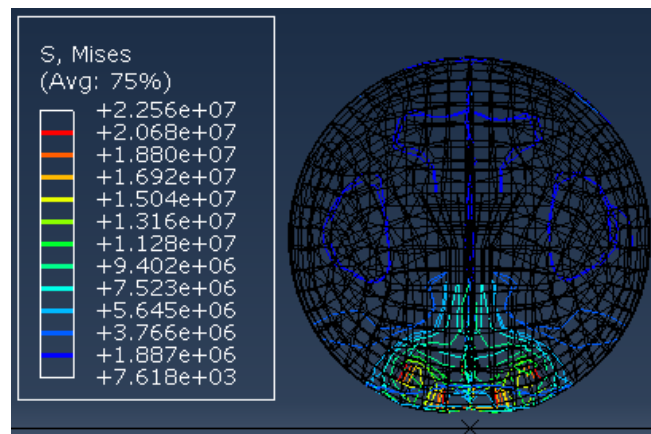
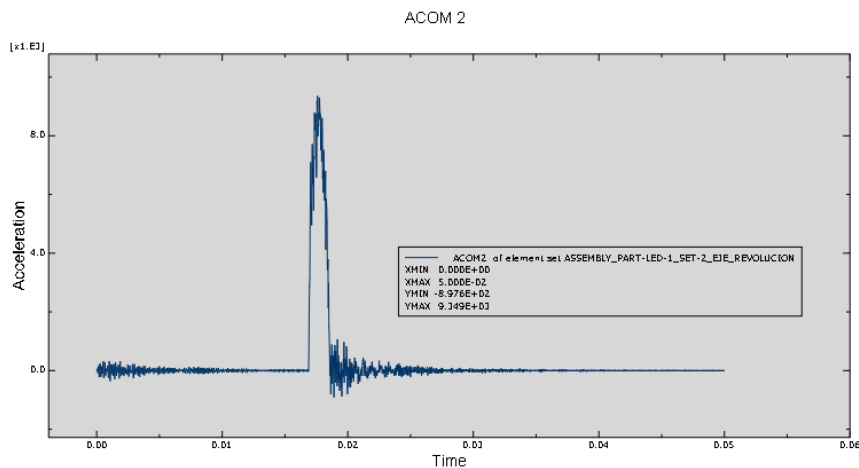


Ilustración 45. Después de 0,021 segundos del lanzamiento

Cabe destacar que las tres imágenes anteriores corresponden a tres instantes sucesivos de 2,5 milésimas de segundo cada uno, las deformaciones máximas durante estos tres instantes se localizan en la zona de contacto con la superficie de impacto ya que si se considera un sistema elástico lineal es correcto afirmar que donde estén localizadas las mayores tensiones también estarán las mayores deformaciones y desplazamientos. La bombilla, a pesar de soportar tal magnitud de aceleración, no llega a tocar la superficie de impacto. A continuación, se presenta una gráfica que representa el valor que ha tomado la media de las aceleraciones longitudinales y rotacionales (variable ACOM) frente al tiempo que ha durado la simulación. El tiempo que ha durado la simulación, contando con la

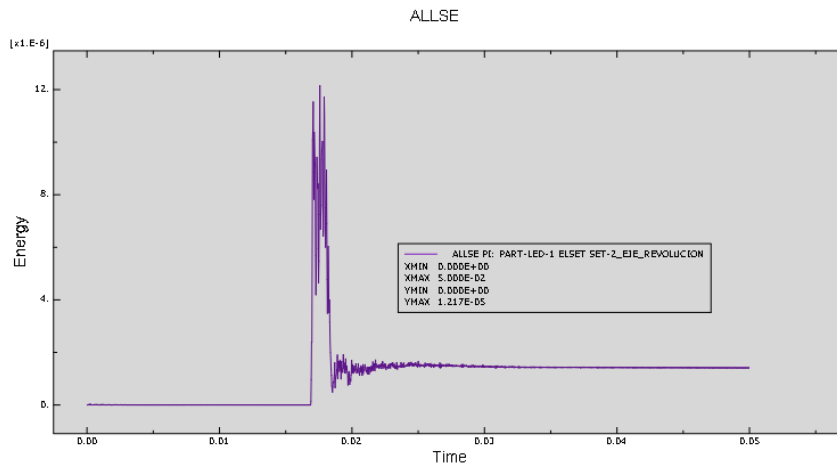
velocidad que lleva el sistema, es el suficiente para que se hinchen los airbags, para que el sistema llegue a entrar en contacto con la superficie de impacto y para que el sistema vuelva a su cota de origen. En estas simulaciones es interesante observar no sólo el valor de aceleración alcanzado por el sistema sino también como se comporta el sistema inmediatamente después de la colisión. Como se puede ver en la gráfica de aceleración del primer modelo el sistema únicamente experimenta un golpe de aceleración a consecuencia del impacto. Que sólo exista un impacto tiene su lógica porque no hay fuerzas que atraigan nuevamente al sistema hacia la superficie de impacto ni tampoco la fuerza del peso del sistema supera la fuerza de reacción generada en el sistema por efecto amortiguamiento de los airbags. La fuerza de la gravedad podría nuevamente atraer el sistema hacia la superficie de impacto si se hubiera tomado en cuenta.



Gráfica 1. Gráfica de aceleraciones del primer modelo

La gráfica que se muestra a continuación representa la energía de deformación recuperable (variable ALLSE) frente al tiempo en que transcurre la simulación de impacto. La energía cinética que el sistema almacena desde el inicio de la simulación hasta el comienzo de la colisión se transforma en otras formas de energía. Una de esas formas de energía se muestra como energía de deformación recuperable, y ésta a su vez debe ser la representación de varias causas o factores como: la compresión de aire contenido en los airbags, las deformaciones generadas en las membranas de los airbags y parte de rozamiento producido entre airbags adyacentes y entre los airbags y la superficie de impacto. Como se puede comprobar el instante que el sistema soporta un aumento de energía de deformación coincide con el instante que el sistema experimenta las mayores aceleraciones. También es interesante indicar como durante el transcurso de la simulación, el sistema ha transformado básicamente la energía cinética en otras formas de energía (potencial, de deformación,

entre otras) pero al comienzo y al final de la simulación mantiene la cantidad de energía total y esto es indicativo del buen funcionamiento del sistema.



Gráfica 2. Energía de deformación recuperable

Hay ciertas variables que pueden ser modificadas con el objetivo de optimizar el sistema de amortiguamiento de la bombilla a través de los airbags. Entre éstas variables se encuentran; modificar la presión interna de los airbags, modificar el espesor de la película de membrana con que están contruidos los airbags, modificar el material y propiedades con que se han representado los airbags. Se realizaron tres simulaciones variando el espesor de las membranas de polietileno para observar que efecto podía tener esta variación sobre las aceleraciones experimentadas en la bombilla led. A la vista de lo resultados se puede decir que modificar el espesor de las membranas de los airbags tiene un efecto importante en el comportamiento del sistema frente al impacto contra una superficie rígida. Como se puede comprobar en la siguiente tabla, al ir reduciendo el espesor de las membranas de los airbags, se va reduciendo la aceleración soportada por la bombilla. Esto es debido a que un espesor mayor de la membrana de los airbags anule el efecto acumulativo de energía por parte del aire contenido dentro de los airbags y no favorezca el efecto amortiguador del aire comprimido. La siguiente tabla se ha realizado con un módulo de Young de $5,4e9$ y un coeficiente de Poisson de 0,45.

Simulación	Espesor (m)	Presión interna (Pa)	ACOM 2 (m/s ²)
1	0,3	10 E+3	8,15E+04
2	0,03	10 E+3	5,50E+04
3	0,003	10 E+3	4,50E+04
4	0,001	10 E+3	2,66E+04
5	0,0001	10 E+3	1,15E+04

Tabla 5.1.2.0. Resultado de aceleraciones variando espesor de membrana

Como se puede comprobar en la siguiente tabla el hecho de variar la presión interna de los airbags en esta tipología no afecta mucho al objetivo buscado de reducir la aceleración del sistema. Se ha probado varias cosas para intentar reducir la aceleración, pero no ha tenido mucho éxito. Los parámetros que se han variado son: la distancia entre cuerpos de colisión, la velocidad inicial del sistema y la presión interna de los airbags.

Simulación	Presión interna (Pa)	ACOM 2 (m/s ²)	Tensión Max (Pa)	Deformación
1	1,00E+03	9,71E+03	2,86E+07	6,82E-02
2	5 E+3	9,35E+03	2,70E+07	1,22E-01
3	10 E+3	9,53E+03	2,73E+07	1,05E-01
4	50 E+3	1,03E+04	2,76E+07	1,15E-01

Tabla 5.1.2.1. Resultado de aceleraciones para el primer modelo

5.2 Segunda tipología considerada

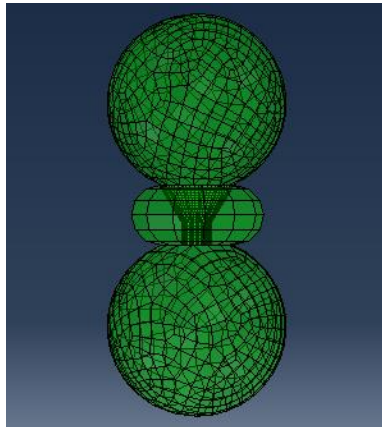


Ilustración 46. Diseño del segundo modelo

El modelo de la segunda simulación presenta un conjunto de tres airbags (superior, central e inferior) que protegen a la bombilla por todas sus superficies. Este modelo fue diseñado como parte de desarrollo del proceso de simulación de Abaqus ya que en ese momento se estaba empezando a controlar el programa. Es un diseño en el que los airbags únicamente están en contacto con el objeto y no lo están entre sí. Es un diseño específicamente preparado para la amortiguación del objeto en dirección vertical pero también pensado para amortiguar los impactos posteriores en caso que tras el primer impacto el sistema gire algunos grados como consecuencia de la no simetría total de la bombilla.

5.2.1 Modelado con 0,1mm de espesor de membrana

A partir de la geometría de la bombilla led se ha diseñado un conjunto de airbags que protegen la parte superior e inferior a través de unos airbags en forma de esfera de 5cm de radio y para proteger la parte central o cuerpo de la bombilla se ha desarrollado un airbag por revolución a partir del perfil de la misma. La distancia a la que se ha situado el sistema con respecto al suelo son 25 centímetros. Si se considera que el sistema se traslada a una velocidad de 8,3 m/s resulta como tiempo hasta el impacto de 0,03 segundos. Por este motivo se ha establecido un periodo de tiempo para la simulación de 0,06 segundos; tiempo suficiente para que el sistema alcance la superficie suelo y vuelva a la altura desde que se lanzó.

5.2.2 Simulación

Para esta simulación se ha utilizado una visión de los resultados que se caracteriza por mostrar únicamente la localización de los valores máximos calculados. Las tres imágenes que se muestran a continuación representan los instantes involucrados en la colisión. La primera muestra las tensiones generadas en el sistema un instante antes de la colisión y como se puede comprobar las tensiones máximas están situadas en las uniones entre los airbags inferior y central e igualmente entre el airbag central y el superior (única zona con tonos amarillos y verdes). Esto es debido a que la presión interna de los airbags está ejerciendo una presión sobre cada uno de los mismos y al contactar dos superficies con direcciones de presión opuestas se genera una zona de altas tensiones.

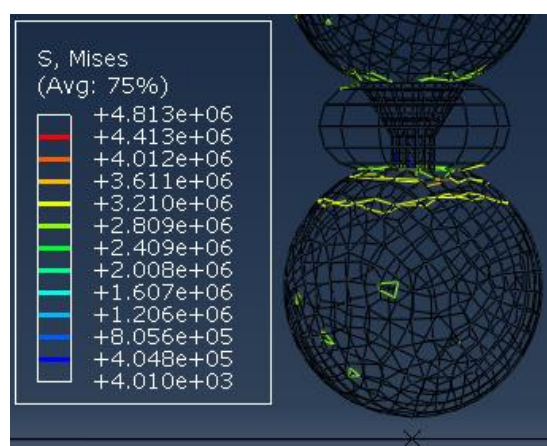


Ilustración 47. Después de 0,014 segundos del lanzamiento

Esta segunda imagen representa el instante de la colisión entre el sistema y el suelo. Ahora las tensiones máximas se localizan en la parte inferior del airbag en contacto con la superficie de impacto. Como consecuencia del impacto, el airbag inferior se deforma de tal manera que provoca

una concentración de tensiones en la zona de colisión. Como se puede comprobar respecto a la primera imagen, hay un salto de un orden de magnitud en las tensiones máximas.

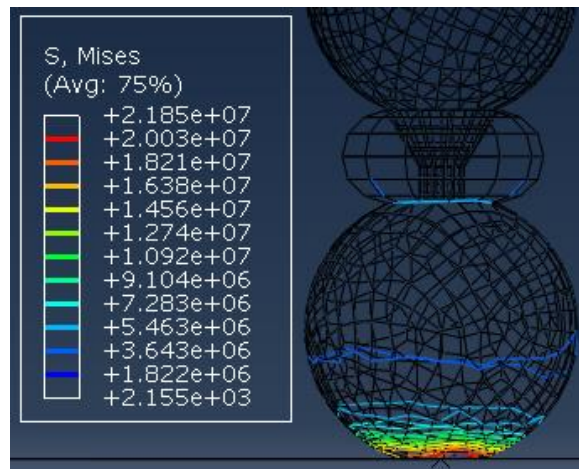


Ilustración 48. Después de 0,016 segundos del lanzamiento

En la siguiente figura se puede observar como la deformación sufrida por el airbag inferior provoca una compresión del gas interno de los airbags, por lo que este gas tiende a empujar el gas hacia donde se le ofrece menos resistencia que es hacia arriba. Inmediatamente por encima del airbag inferior se encuentra el airbag central con la misma presión interna que los otros airbags y que ofrece resistencia al desplazamiento del airbag inferior. Como consecuencia, en la parte superior del airbag que ha colisionado se generan unas nuevas tensiones debidas a la oposición de desplazamiento que provoca el airbag central del sistema.

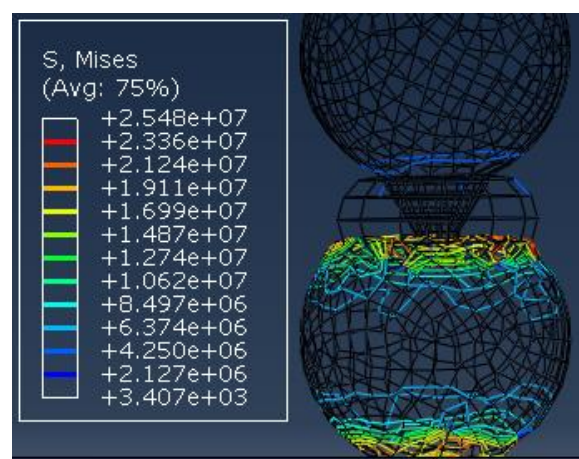


Ilustración 49. Después de 0,02 segundos del lanzamiento

La última imagen representa un instante después de la colisión y se puede observar como las tensiones máximas correspondientes al contacto entre el airbag y el suelo han desaparecido, así como las deformaciones la zona inferior del airbag. Al desaparecer las deformaciones en esta zona el volumen de gas contenido en el airbag inferior ha aumentado por lo que las tensiones que se habían generado entre los airbags adyacentes han disminuido

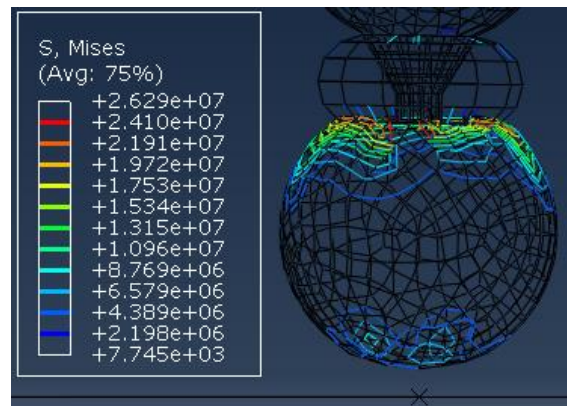
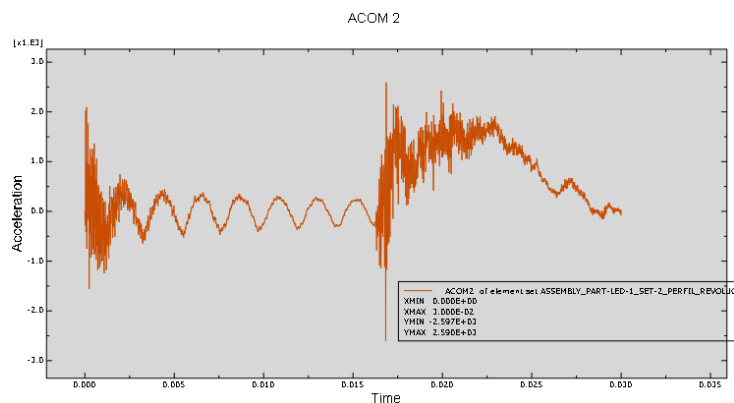


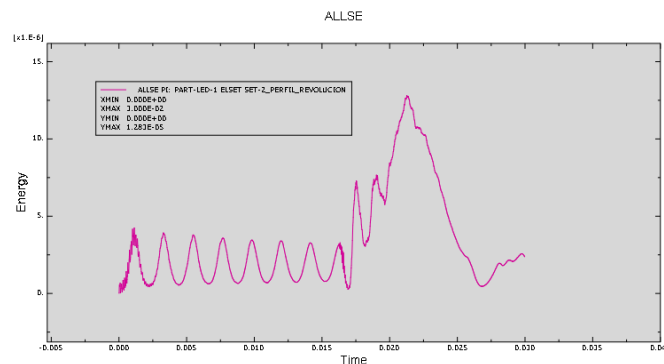
Ilustración 50. Después de 0,032 segundos del lanzamiento

Cabe destacar que las tres imágenes anteriores corresponden a tres instantes sucesivos de 2,5 milésimas de segundo cada uno, las deformaciones máximas durante estos tres instantes se localizan en la zona de impacto del sistema y que la bombilla, a pesar de soportar tal magnitud de aceleración, no llega a tocar la superficie de impacto. A continuación, se presenta la gráfica que representa el valor que ha tomado la media de las aceleraciones longitudinales y rotacionales (variable ACOM) frente al tiempo que ha durado la simulación. El tiempo que ha durado la simulación, contando con la velocidad que lleva el sistema, es el suficiente para que se hinchen los airbags, para que el sistema llegue a entrar en contacto con la superficie de impacto y para que el sistema vuelva a su cota de origen. En estas simulaciones es interesante observar no sólo el valor de aceleración alcanzado por el sistema sino también como se comporta el sistema inmediatamente después de la colisión.



Gráfica 3. Gráfica de aceleraciones para el segundo modelo

Como se puede observar en la gráfica de aceleraciones hay dos picos de aceleración. El primero se debe a hinchado de los airbags provocan que la bombilla se mueva en el interior del sistema y se genere así una aceleración en la bombilla de $2 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$. El segundo se debe al impacto sufrido por el sistema al colisionar este sobre la superficie rígida y que provoca una aceleración máxima de $2,6 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$. La gráfica siguiente (Gráfica 4) representa la energía de deformación recuperable (variable ALLSE) frente al tiempo en que transcurre la simulación de impacto. Como se puede observar al comienzo de la simulación existe una oscilación suave debida al inflado de los airbags y esta se va atenuando ligeramente hasta que se produce la colisión que corresponde con el pico máximo de energía de deformación recuperable. La energía cinética que el sistema almacena desde el inicio se transforma en otras formas de energía. Una de esas formas de energía se muestra como energía de deformación recuperable, y ésta a su vez debe ser la representación de varias causas o factores como: la compresión de aire contenido en los airbags, las deformaciones generadas en las membranas de los airbags y parte de rozamiento producido entre airbags adyacentes y entre los airbags y la superficie de impacto.



Gráfica 4. Energía de deformación recuperable

En la siguiente imagen (figura 5.2.2.7) se muestra la deformación producida en el sistema como consecuencia de la colisión entre este y la superficie de contacto. En ella se puede ver como es el airbag inferior el que se ha deformado mayoritariamente y que los otros dos no han sufrido modificación alguna. En el caso del airbag superior es comprensible que no se provoque ninguna deformación ya que no está unido a ningún otro airbag y además no interviene en el amortiguamiento del sistema (el sistema no colisiona a través de este airbag). Pero en el caso del airbag central tampoco se observa deformación alguna y de hecho está en contacto con el airbag inferior. Esto se debe a que el airbag central tiene las mismas propiedades que los otros airbags (presión interna, espesor de membrana, material) pero tiene menos volumen con lo que consigue ser más firme y oponer más resistencia a ser deformado.

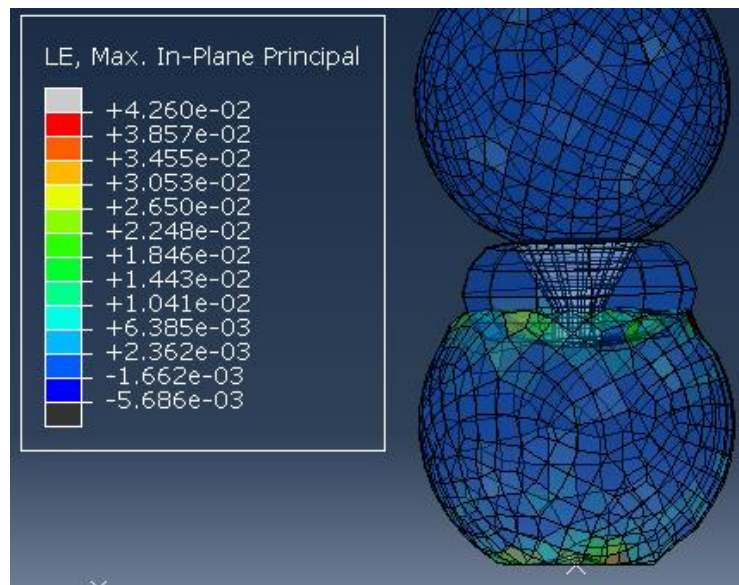


Ilustración 51. Deformación máxima del segundo modelo

De la segunda tipología se realizaron cuatro lanzamientos modificando únicamente el valor de la presión interna de los airbags. A pesar de la diferencia entre las presiones internas utilizadas para realizar los experimentos, se puede comprobar cómo en esta tipología no existe apenas cambio en las aceleraciones soportadas por la bombilla. Sólo existe un cambio brusco en los resultados de aceleraciones y corresponde con el salto de presión interna de 10 a 50 kPa en el que la aceleración resulta ser más del triple. En cuanto a las tensiones no se presentan cambios significativos de respuesta ante la simulación de colisión. Con respecto a las deformaciones hay que indicar la disminución de estas a medida que se va aumentando la presión interna de los airbags pero también existe un salto brusco al modificar la presión de 10 a 50 kPa en la que cuando se suponía que debería haberse reducido la deformación el comportamiento es contrario.

Simulación	Presión interna (Pa)	ACOM 2 (m/s ²)	Tensión max (Pa)	Deformación max
1	1 E+3	2,96E+03	2,64E+07	8,56E-02
2	5 E+3	3,01E+03	2,67E+07	4,90E-02
3	10 E+3	2,59E+03	2,66E+07	4,50E-02
4	50 E+3	1,10E+04	2,64E+07	6,10E-02

Tabla 5.2.3.1. Aceleraciones del segundo modelo

5.3 Tercera tipología considerada

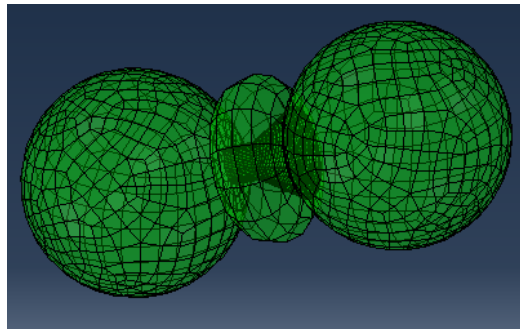


Ilustración 52. Tercera tipología considerada

5.3.1 Modelado con 0,1mm de espesor de membrana

Esta simulación es una variante del segundo modelo ya que la disposición de caída no es la misma pero la dirección y sentido de la velocidad si es la misma. Se pretende analizar el comportamiento del modelo anterior en el supuesto que este impacte contra el suelo de forma horizontal. Para ello simplemente se ha hecho uso de la herramienta “Rotate Instance” la cual permite girar la parte del sistema que se quiera. En este caso se da un giro de 90 grados al conjunto. La simulación se lanza desde una altura aproximada de 10 cm con una velocidad de 8,3 m/s lo que nos resulta en un tiempo de 0.012 segundos para que los dos cuerpos entren en contacto. Consecuentemente, se ha establecido 0,024 segundos como periodo de tiempo en el Step-Explicit para que el sistema le dé tiempo a impactar contra el suelo y llegar a su altura inicial.

5.3.2 Simulación

Esta serie de imágenes representan el impacto sufrido por el sistema contra el suelo. En la primera imagen se observa como el sistema comienza a tomar contacto con la superficie rígida y las tensiones máximas se concentran en la unión entre los airbags inferior y central y también sobre la base de la bombilla. El resto de tensiones representadas en la imagen y que son de menor intensidad se reparten por la superficie de los airbags debido a la presión que ejerce el gas en su interior.

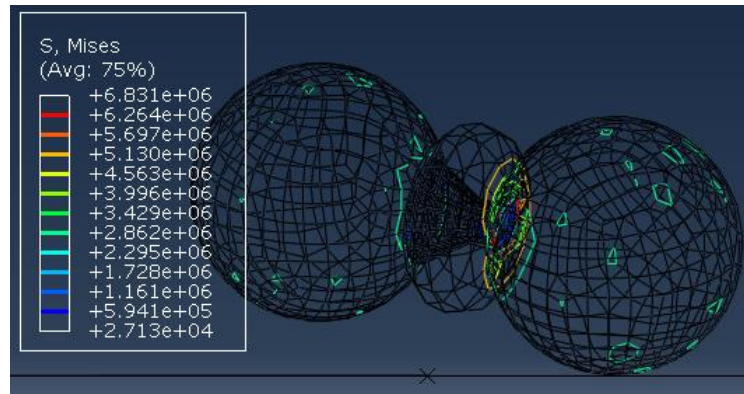


Ilustración 53. Después de 0.0125 segundos del lanzamiento

En la segunda imagen de la secuencia se puede observar el primer impacto que sufre el sistema ya que la distancia entre los airbags y el suelo no es la misma. En la imagen se puede ver como la tensión máxima está concentrada en dos zonas diferenciadas. Una primera zona que corresponde al punto de impacto y una segunda zona que corresponde a la unión que existe entre el airbag más a la derecha y el central. En estas dos zonas se puede ver como existe una deformación; la primera provocada por el impacto y la segunda por el retorcimiento que está sufriendo el sistema como consecuencia de la disposición de caída.

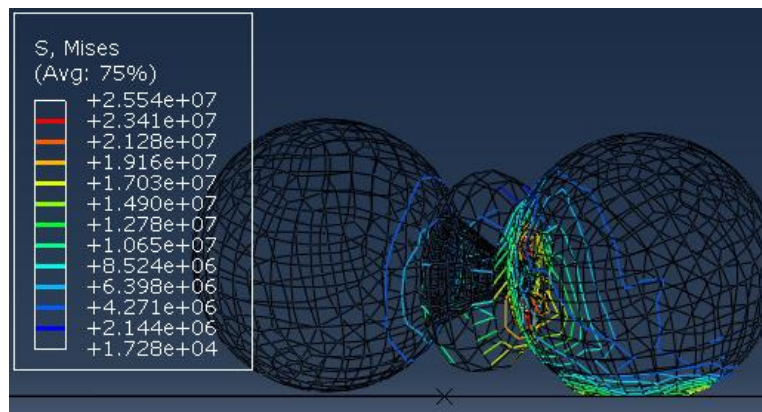


Ilustración 54. Después de 0.015 segundos del lanzamiento

Tras la primera colisión por parte del airbag de la derecha hay una segunda colisión por parte del resto de los airbags involucrados en el sistema. En la máxima expresión de deformación que sufre este sistema de amortiguamiento se puede ver como el airbag central, a pesar de ser más pequeño llega a contactar con el suelo. Por lo tanto, las tensiones se van extendiendo desde el airbag más a la derecha, pasando por el central y acabando en el airbag más a la izquierda. A pesar de la disposición de caída, la bombilla no llega a tocar el suelo por lo tanto en esta simulación no existen picos de aceleración.

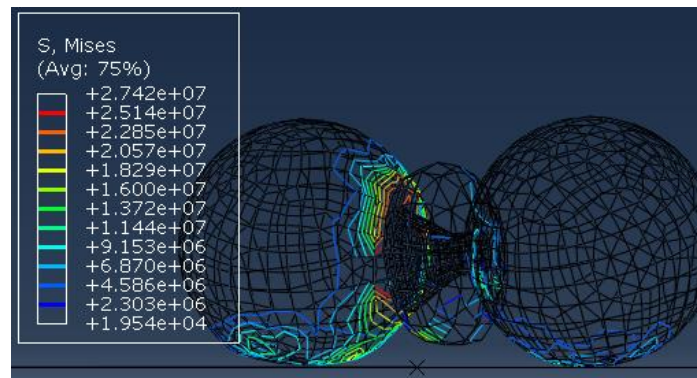


Ilustración 55. Después de 0.02 segundos del lanzamiento

En la última imagen se ve como el sistema se ha separado de la superficie de impacto y las tensiones del airbag que colisionó primero ya casi han desaparecido. Todavía queda un remanente de tensiones localizadas entre la bombilla y el airbag adyacente debido a que el sistema es elástico y esa zona todavía se está deformando. Después de la segunda colisión el sistema se separa del suelo y vuelve hacia su punto de partida, las tensiones van disminuyendo hasta repartirse por todo el sistema y aumenta su momento angular debido a la excentricidad de las colisiones producidas.

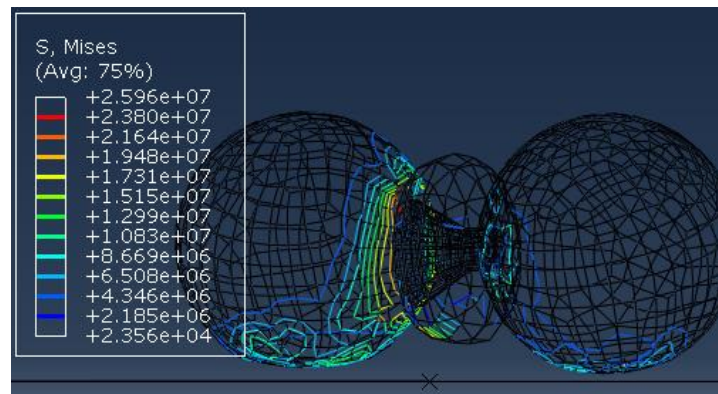
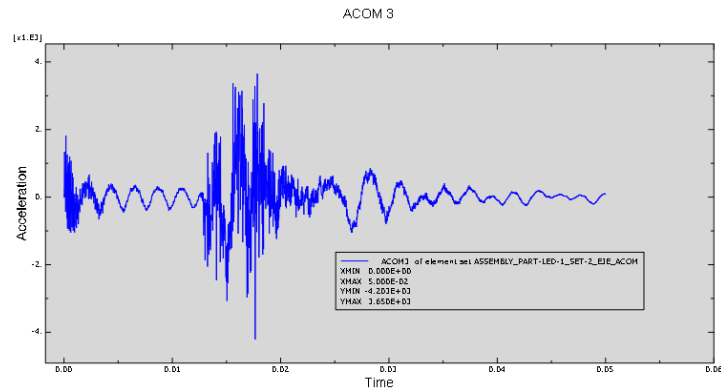


Ilustración 56. Después de 0.025 segundos del lanzamiento

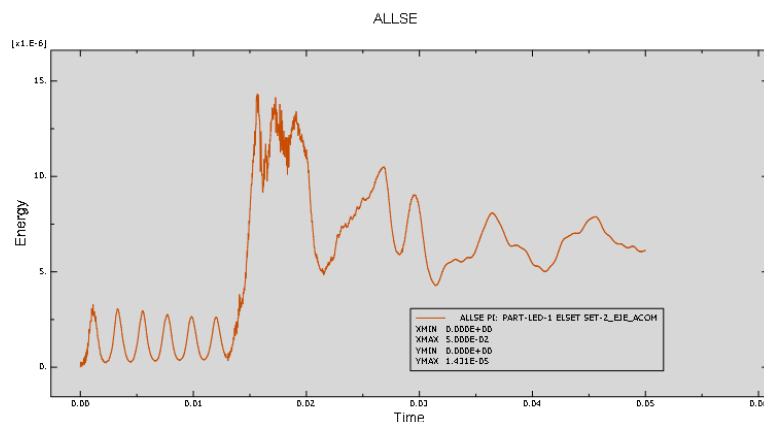
A continuación, se presenta una gráfica que representa el valor que ha tomado la media de las aceleraciones longitudinales y rotacionales (variable ACOM) frente al tiempo que ha durado la simulación. El tiempo que ha durado la simulación, contando con la velocidad que lleva el sistema, es el suficiente para que se hinchen los airbags, para que el sistema llegue a entrar en contacto con la superficie de impacto y para que el sistema vuelva a su cota de origen. En estas simulaciones es interesante observar no sólo el valor de aceleración alcanzado por el sistema sino también como se comporta el sistema inmediatamente después de la colisión. Esta gráfica representa las

aceleraciones ACOM 3 en dirección Z de un set de elementos creado a lo largo del eje longitudinal de la bombilla led. Como puede observarse, la gráfica presenta un pico de aceleración y esto como ya se ha comentado anteriormente puede ser debido al giro brusco generado por la excentricidad de la primera colisión.



Gráfica 5. Aceleración del tercer modelo

La siguiente gráfica (Gráfica 6) representa la energía de deformación recuperable (variable ALLSE) frente al tiempo en que transcurre la simulación de impacto. Como se observa en la gráfica, antes del primer contacto hay una oscilación de energía de deformación causado por el inflado instantáneo del gas dentro de los airbags. Esto supone que el sistema amortigüe el efecto del inflado de los airbags acumulando algo de energía. A continuación, se observa como hay un aumento de energía en forma de tres picos. Estos picos representan la colisión secuencial de cada uno de los airbags contra la superficie de impacto. Al final se ve como, una vez que los airbags se han separado del suelo, el sistema comienza a liberar energía recuperando la forma original de los airbags.



Gráfica 6. Energía de deformación recuperable

Simulación	Presión interna (Pa)	ACOM 2 (m/s ²)	Tensión Max (Pa)	Deformación
1	1 E+3	8,01E+03	2,71E+07	9,88E-02
2	5 E+3	6,41E+03	2,71E+07	1,17E-01
3	10 E+3	4,20E+03	2,74E+07	1,28E-01
4	50 E+3	7,44E+03	2,73E+07	1,92E-01

Tabla 5.3. Aceleraciones máximas para el tercer modelo

Sobre el modelo considerado en este caso se realizaron varios lanzamientos en la que la única variable que cambiaba era la presión interna de los airbags. Hay que tener en cuenta que para este modelo los airbags tienen un espesor de membrana de 0,0001 m, que el sistema se lanza con una velocidad de 8,3m/s y que el tiempo que se ha establecido para la visualización es de 0,05 segundos. Después de lanzar las distintas simulaciones se puede afirmar que, a pesar de ir aumentando la presión interna, las tensiones máximas localizadas en los puntos de impacto y en las uniones entre airbags y entre airbags y la bombilla no han variado especialmente. Ciertamente es que las tensiones previas a los primeros impactos correspondientes al inflado de los airbags si reflejaban un aumento y a medida que se iba aumentando la presión interna de los airbags existía menor diferencia entre las tensiones generadas por las colisiones y las tensiones generadas por el inflado de los airbags.

De todas las simulaciones lanzadas, la que menor aceleración del objeto ha recibido corresponde con un inflado de los airbags de 10 kPa. Debido a la disposición del sistema para la simulación de impacto, se producen tres colisiones sucesivas. El primero impacto sufrido por el sistema llega a sobrepasar los $2 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ y el segundo pico de aceleración corresponde a un cabeceo producido en el sistema. Este cabeceo del sistema provoca una rotación sobre sí mismo y consecuentemente un segundo impacto con su correspondiente aumento de aceleración. Es decir, que a la aceleración generada en el sistema tras el primer impacto se le añade una segunda aceleración provocada por el cabeceo del sistema, con lo que se alcanza una aceleración de $4,2 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$. Tras haber aumentado la presión hasta los 50 kPa la aceleración se ha visto aumentado sobretodo en el segundo impacto hasta alcanzar los $7,44 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ lo que supone un aumento de entorno al 45%. Sin embargo, la aceleración reflejada para el primer impacto no ha sufrido casi modificación alguna y permanece inalterable a pesar de haber aumentado la presión interna de los airbags un 500%.

5.4 Cuarta tipología considerada

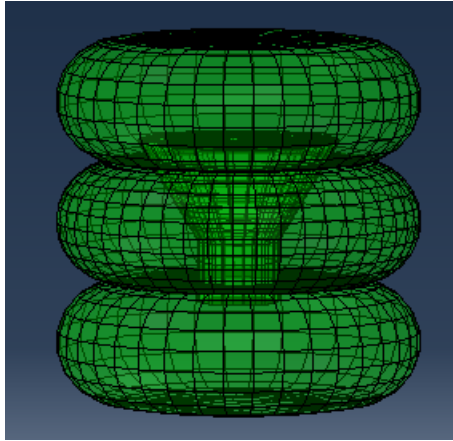


Ilustración 57. Diseño del tercer modelo

5.4.1 Modelado con 1mm de espesor de membrana

Para el diseño de los airbags incluidos en este sistema se ha pensado en que la disposición horizontal de los mismos pudiera presentar un buen resultado de amortiguamiento frente al impacto contra el suelo. Colocando los airbags en sentido horizontal se quería dar una orientación totalmente opuesta a la del primer modelo cuyos airbags están en dirección vertical. Además, se pretendía que el efecto amortiguador del primer airbag en contacto con el suelo sería ayudado por el resto de airbags que están en contacto dos a dos. Este sistema tiene tres airbags dispuestos horizontalmente y que protegen a la bombilla en todo su contorno. Para el diseño de los airbags se ha partido de perfil de la bombilla led y se han generado por revolución hasta cubrir los 360 grados. Como para diseñar un volumen de revolución el programa exige la creación de un perfil encerrado en cuatro líneas (estas pueden ser curvas o rectas) entonces cada uno de los airbags se ha generado individualmente. Durante el diseño de los airbags se ha tenido especial atención para que las superficies de contacto entre airbags fueran precisas y a la postre el sistema de análisis no diera problemas de unión entre airbags. Se ha procurado que el tamaño de los airbags no fuera desproporcionado con respecto al tamaño de la bombilla led. A partir de la altura de la bombilla se ha querido dotar al sistema de tres airbags que tuvieran la misma altura por lo tanto se ha tomado casi toda la altura de la bombilla para el airbag central y los otros dos para que cubrieran la parte superior e inferior de la bombilla más lo que no había cubierto el airbag central.

5.4.2 Simulación

La siguiente secuencia de imágenes corresponden a la colisión producida en el sistema tras el lanzamiento de la simulación. Esta simulación corresponde a la que ha proporcionado menor grado de aceleración en esta disposición. En la primera imagen se observa como los airbags del sistema se han expandido antes de entrar en contacto con el suelo. En concreto, en esta imagen, el airbag superior es el que está soportando las mayores tensiones equivalentes a pesar de que los tres airbags tienen las mismas condiciones. También se observa como ya existen tensiones importantes entre las membranas de los airbags adyacentes y como la base de la bombilla también está soportando unas ligeras tensiones que se deben a la presión que ejerce el gas interior sobre las membranas que lo delimitan.

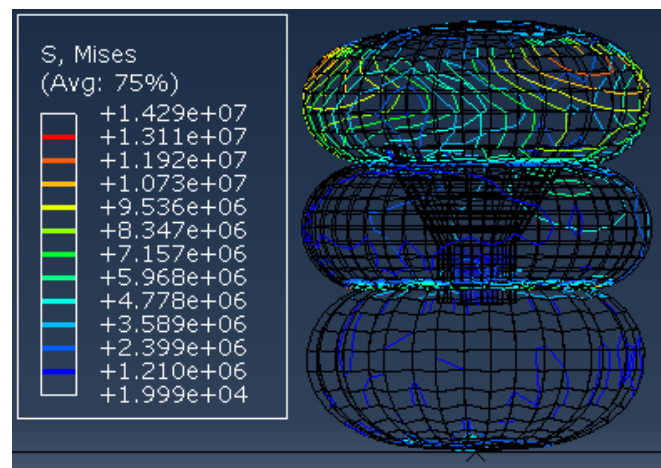


Ilustración 58. Después de 0,008 segundos del lanzamiento

En la siguiente imagen se observa como el sistema ha impactado totalmente con la superficie rígida y aun así la bombilla no ha llegado a tocar el suelo. Se observa como el airbag inferior se ha deformado hasta el punto de comprimirse hasta más de la mitad del volumen que había alcanzado a través del gas interior. Como consecuencia de la deformación sufrida tras la colisión, en el airbag inferior se están generando las máximas tensiones representadas por dos líneas pequeñas rojas que se ven en la parte baja de la imagen. El airbag central ayuda a mantener el efecto amortiguador del airbag inferior pero el airbag superior se mantiene expandido si no estuviera contribuyendo a amortiguar el impacto del sistema.

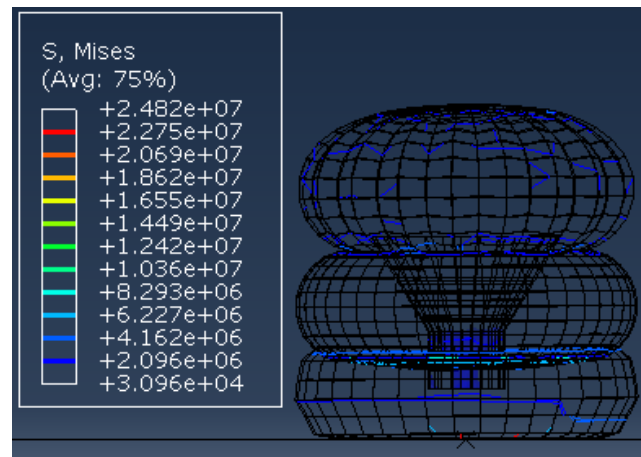


Ilustración 59. Después de 0,012 segundos del lanzamiento

En la última imagen se ve como el sistema ya se ha despegado de la superficie de impacto y los airbags empiezan a recuperar la forma inicial. Ahora las tensiones máximas están localizadas principalmente entre las uniones de los airbags y muy especialmente entre los airbags central y superior. El valor de estas tensiones ha disminuido hasta casi la mitad de las tensiones provocadas por el impacto. También se observa como la bombilla mantiene las tensiones iniciales provocadas por la presión interna que ejerce el gas sobre las caras internas de los airbags.

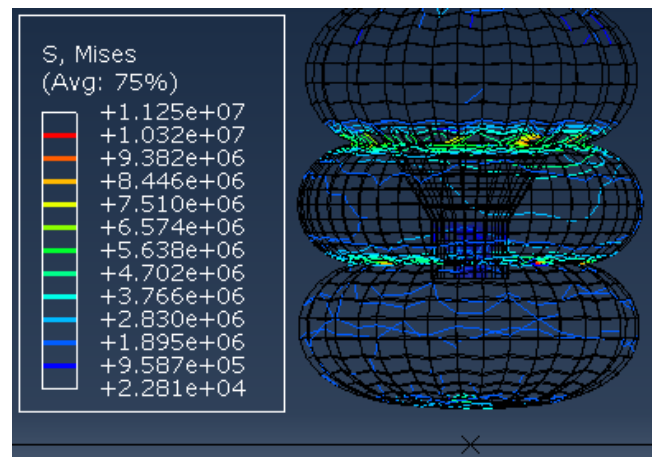
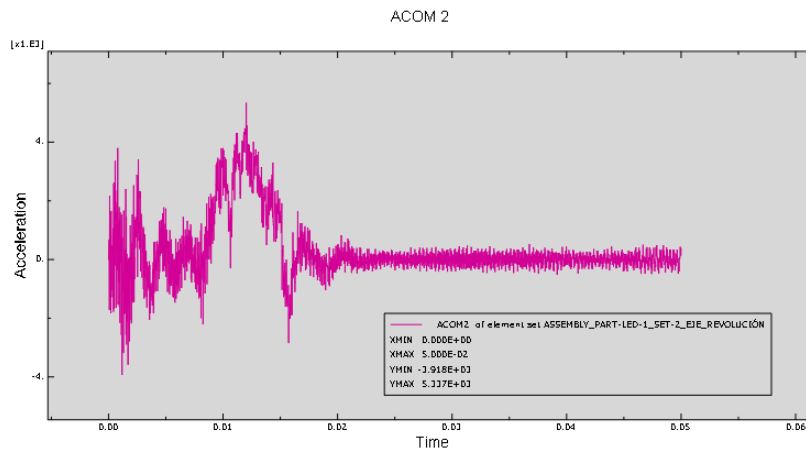


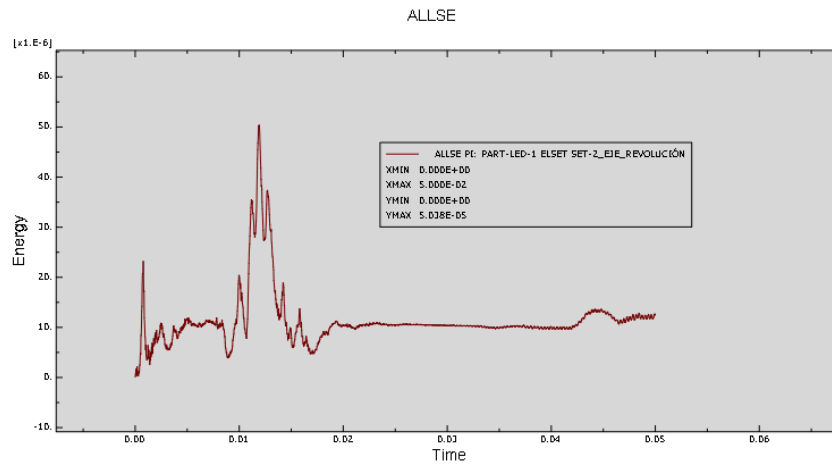
Ilustración 60. Después de 0,018 segundos del lanzamiento

Para poder analizar las aceleraciones generadas en la bombilla a causa del impacto se ha tenido que crear un set de elementos representativos de la misma. El programa Abaqus no ejecuta un análisis para obtener los resultados de aceleración ACOM para un set de nodos y por otra parte si se ejecuta este análisis para todo el sólido rígido que representa la bombilla entonces el programa consume demasiado tiempo. La gráfica de la figura (Gráfica 7) representa la media de aceleraciones longitudinales y rotacionales en dirección vertical. Como se puede comprobar hasta la centésima de

segundo no existen aceleraciones ya que el sistema se traslada a velocidad constante. A partir de ese instante se produce el impacto entre el sistema y el suelo y por tanto hay un aumento brusco de aceleración debido a la fuerza de reacción generada por la colisión. En los instantes posteriores a la colisión se ve como la aceleración va disminuyendo de intensidad



Esta segunda gráfica (Gráfica 8) representa la energía de deformación recuperable (variable ALLSE) frente al tiempo en que transcurre la simulación de impacto. La energía cinética que el sistema almacena desde el inicio de la simulación hasta el comienzo de la colisión se transforma en otras formas de energía. Una de esas formas de energía se muestra como energía de deformación recuperable, y ésta a su vez debe ser la representación de varias causas o factores como: la compresión de aire contenido en los airbags, las deformaciones generadas en las membranas de los airbags y parte de rozamiento producido entre airbags adyacentes y entre los airbags y la superficie de impacto. Como se puede comprobar el instante que el sistema soporta un aumento de energía de deformación coincide con el instante que el sistema experimenta las mayores aceleraciones. También es interesante indicar como durante el transcurso de la simulación, el sistema ha transformado básicamente la energía cinética en otras formas de energía (potencial, de deformación, entre otras) pero a medida que el sistema ha sido amortiguado y ha perdido la velocidad inicial ya prácticamente no hay energía cinética que transformar. Por tanto, la energía de deformación recuperable se estabiliza en valores cercanos a cero y esto es indicativo del buen funcionamiento del sistema.



Gráfica 8. Energía de deformación recuperable

Simulación	Presión interna (Pa)	ACOM 2 (m/s ²)	Tensión max (Pa)	Deformación max
1	1 E+3	2,10E+05	2,50E+07	1,17E-02
2	5 E+3	1,80E+05	2,15E+07	5,92E-03
3	10 E+3	4,93E+04	2,51E+07	1,38E-02
4	50 E+3	4,95E+03	2,27E+07	8,34E-03
5	100 E+3	1,36E+04	2,51E+07	1,87E-02

Tabla 5.4. Resultados de aceleración para el cuarto modelo

Las aceleraciones resultantes del cuarto modelo se presentan en la tabla 5.4. En ellas se puede comprobar como el parámetro que se ha variado ha sido la presión interna de los airbags desde 1 hasta 100 MPa. Como consecuencia de ir aumentando la presión interna, el modelo de protección contra impactos ha experimentado progreso en su función para la amortiguación del objeto. Esto se refleja en los valores medios de aceleración longitudinal y rotacional en dirección vertical (eje Y) a través del parámetro ACOM 2 en el que se alcanza los $4,95 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ con una presión interna de 50 kPa. En cuanto a las tensiones equivalentes máximas alcanzadas la tabla muestra que en todas las simulaciones lanzadas los resultados son prácticamente iguales, pero en cambio con respecto a las deformaciones se puede observar cómo existe una ligera disparidad entre las diferentes simulaciones.

5.5 Quinta tipología considerada

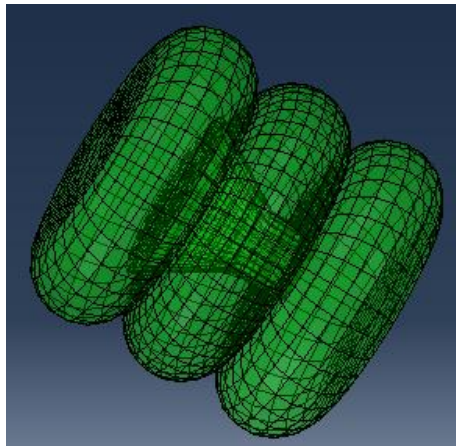


Ilustración 61. Quinta tipología considerada

5.5.1 Modelado con 1mm de espesor de membrana

Esta simulación es una variante del tercer modelo ya que la disposición de caída no es la misma. Se pretende analizar el comportamiento del modelo anterior en el supuesto que este impacte contra el suelo de forma diagonal. Para ello simplemente se ha hecho uso de la herramienta “Rotate Instance” la cual permite girar la parte del sistema que se quiera. En este caso se dio un giro de 45 grados al conjunto. La simulación se lanza desde una altura aproximada de 10 cm con una velocidad de 8,3 m/s lo que nos resulta en un tiempo de 0.012 segundos para que los dos cuerpos entren en contacto. Consecuentemente, se ha establecido 0,024 segundos como periodo de tiempo en el Step-Explicit para que el sistema le dé tiempo a impactar contra el suelo y llegar a su altura inicial.

5.5.2 Simulación

Esta simulación corresponde a la que ha proporcionado menor grado de aceleración de las simulaciones lanzadas. En esta simulación el modelo creado en anterior tipología se ha girado 45 grados sobre su eje longitudinal para ofrecer una visión de caída aleatoria y así poder analizar cómo responde el sistema ante una caída irregular. En la primera imagen se puede ver como el sistema ha comenzado a impactar contra el suelo a través del airbag inferior y en él se observa como el airbag ha comenzado a deformarse reflejando en ese punto las mayores tensiones.

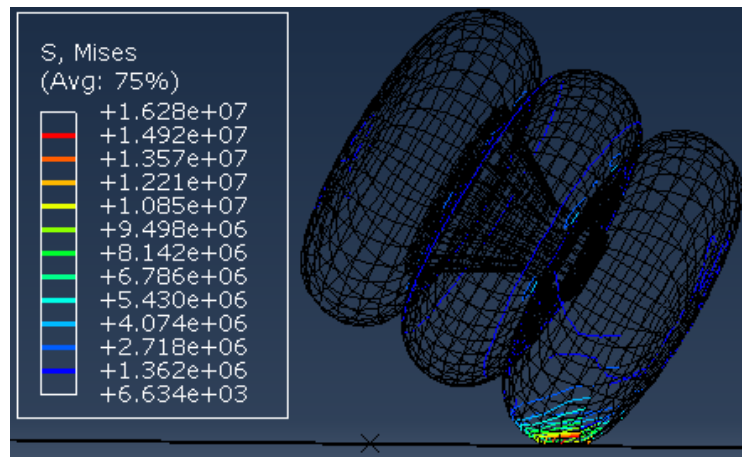


Ilustración 62. Después de 0,0225 segundos del lanzamiento

El airbag inferior es el que está soportando la totalidad del impacto y prueba de ello se observa en la deformación que se está produciendo en él. En este instante de tiempo es cuando se suceden las máximas tensiones y estas se localizan principalmente en el punto de impacto y en la unión de las membranas de los airbags inferior y central. En esta imagen se observa como el airbag inferior llega incluso a penetrar en el espacio del airbag central. La consecuencia de esta penetración es que en esos puntos se están generando las máximas tensiones.

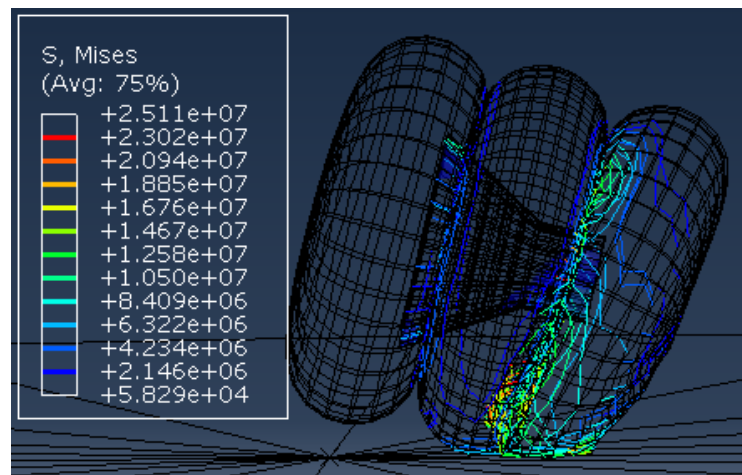


Ilustración 63. Después de 0,025 segundos del lanzamiento

En la siguiente imagen se puede ver como las tensiones generadas en el airbag inferior como consecuencia del impacto se han trasladado a lo largo del sistema hasta alcanzar la parte superior de la bombilla. Se observa como en la parte superior de la bombilla se alcanzan ahora las mayores tensiones sin llegar al valor de las tensiones alcanzadas en el punto de impacto. En este instante la parte superior del sistema representada por el airbag superior toca levemente la superficie de

impacto sin llegar a generarse en ese punto una segunda colisión ni tampoco tensiones superficiales relevantes.

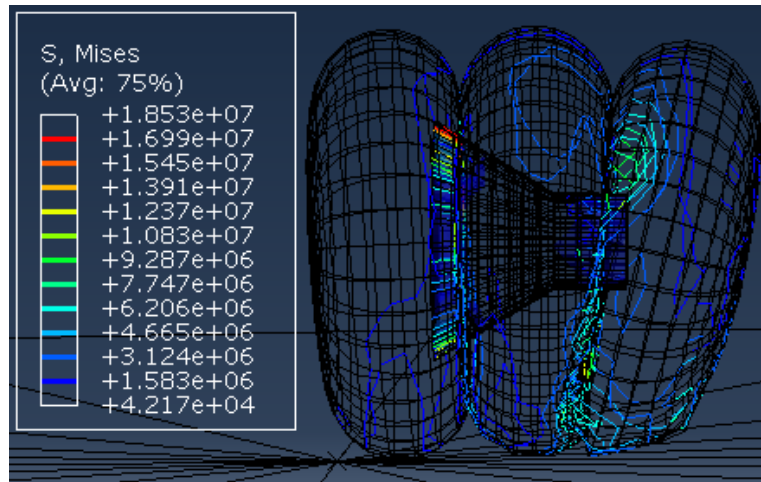


Ilustración 64. Después de 0,0275 segundos del lanzamiento

En la última imagen de la secuencia se ve cómo el sistema ya ha rebotado y se está despegando del suelo. Las tensiones máximas en este instante siguen produciéndose sobre la zona superior de la bombilla e incluso han aumentado de valor con respecto a las del instante anterior. Debido a la excentricidad del punto de partida del lanzamiento, el sistema tras impactar con la superficie rígida experimenta un cabeceo que provoca que el sistema impacte de nuevo por la parte superior de este. Al final ese contacto es mínimo e incluso facilita que el sistema recupere su posición previa al cabeceo.

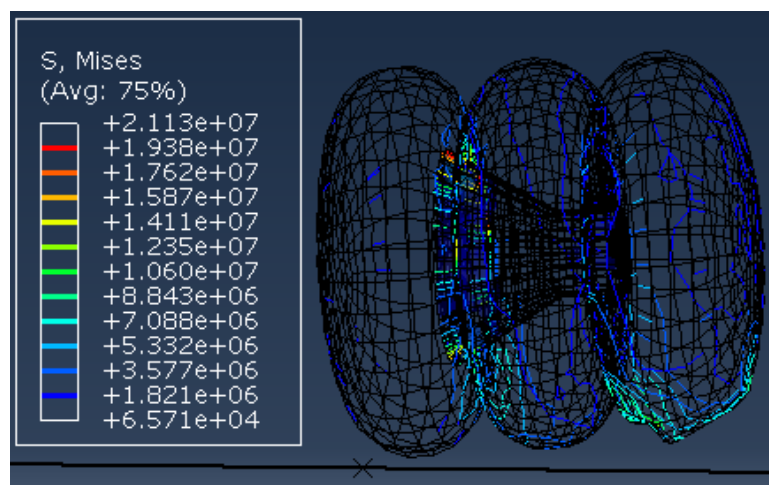
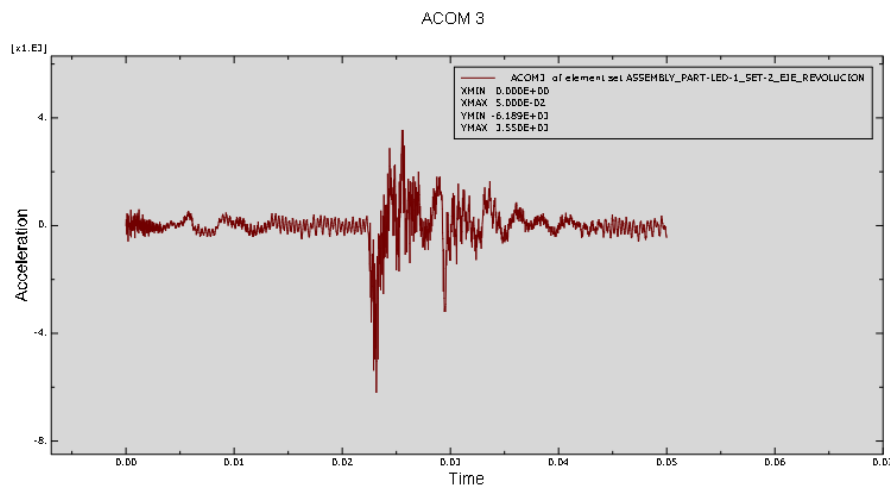


Ilustración 65. Después de 0,03 segundos del lanzamiento

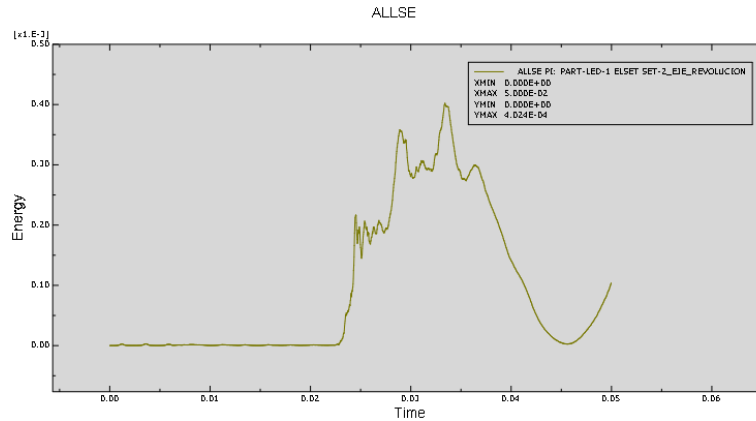
A continuación, en la gráfica 9 se presenta la representación del valor que ha tomado la media de las aceleraciones longitudinales y rotacionales (variable ACOM 3) frente al tiempo que ha durado la simulación. El tiempo que ha durado la simulación, contando con la velocidad que lleva el sistema, es el suficiente para que se hinchen los airbags, para que el sistema llegue a entrar en contacto con la superficie de impacto y para que el sistema vuelva a su cota de origen. En estas simulaciones es interesante observar no sólo el valor de aceleración alcanzado por el sistema sino también como se comporta el sistema inmediatamente después de la colisión. A menudo, si se establece un tiempo de simulación alto, el sistema impacta contra la superficie y después el sistema rebota elevándose hasta que el tiempo de la simulación termina. Es durante el tiempo que rebota el sistema cuando éste puede experimentar aumentos de aceleración progresiva debido a vibraciones residuales debido al carácter elástico de las membranas que concluyan con efectos de resonancia y de ahí las posibilidades de aumento de aceleración de los sistemas tras el impacto. En ese caso se podría resolver el problema liberando el gas contenido de los airbags segundos después de la colisión.



Gráfica 9. Aceleración del quinto modelo

La siguiente gráfica (Gráfica 10) representa la energía de deformación recuperable (variable ALLSE) frente al tiempo en que transcurre la simulación de impacto. En la gráfica se observa como al inicio no hay transformación de la energía cinética en otras formas de energía correspondientes a una colisión. En el instante de la colisión el airbag inferior es el único que impacta contra el suelo y debido a la disposición excéntrica de caída el sistema cabecea. Como consecuencia de la excentricidad suceden dos efectos; uno, que el sistema cabecea y aparentemente el airbag superior colisiona contra el suelo y dos, que en la zona de primer impacto se produce un fuerte rozamiento que provoca la estabilización posicional del sistema. Estos picos de energía de deformación

representan la colisión secuencial de cada uno de los airbags contra la superficie de impacto. Al final se ve como, una vez que los airbags se han separado del suelo, el sistema comienza a liberar energía recuperando la forma original de los airbags.



Gráfica 10. Energía de deformación recuperable

Para la quinta tipología se han realizado cinco lanzamientos de simulación variando únicamente la presión interna de los airbags ya que el espesor y la altura del lanzamiento ya se han establecido anteriormente. Cada simulación reflejada en la tabla 5.5 representa el instante en que la bombilla ha experimentado la máxima aceleración durante el lanzamiento. Como se puede comprobar a medida que se ha aumentado la presión interna, la aceleración ha experimentado un comportamiento irregular ya que los resultados muestran una correspondencia ilógica con el aumento de presión interna. En este experimento a pesar de haber aumentado la presión interna, no se muestra variación alguna con respecto a las tensiones máximas equivalentes ya que estas permanecen prácticamente constantes. Con respecto a las deformaciones generadas en el sistema en los instantes en que la bombilla soportaba su máxima aceleración se puede comprobar cómo han ido aumentando a medida que se dotaba a los airbags un incremento de presión interna.

Simulación	Presión interna (Pa)	ACOM 2 (m/s ²)	Tensión max (Pa)	Deformación max
1	1 E+3	7,91E+03	2,51E+07	2,70E-02
2	5 E+3	8,43E+03	2,52E+07	2,73E-02
3	10 E+3	6,19E+03	2,51E+07	3,85E-02
4	50 E+3	6,67E+03	2,52E+07	6,61E-02
5	100 E+3	8,87E+03	2,51E+07	7,02E-02

Tabla 5.5. Aceleraciones máximas del quinto modelo

6 ANÁLISIS PRESUPUESTARIO

La situación de los mercados, con una estructura que va cambiando mucho más rápido de como lo hacía en tiempos pasados y la acelerada evolución de las nuevas tecnologías, obligan a las empresas a adoptar una posición frente a su futuro en el que la experiencia, sin perder todo su valor, ya no es suficiente para atender los retos que tienen por delante y se le presentan cada día. La palabra presupuesto, proviene del verbo presuponer, que significa dar por sentado previamente una cosa. Se acepta también que presuponer significa formar anticipadamente el cómputo de ingresos y gastos de una empresa o persona jurídica cualquiera. El presupuesto es un documento detallado de los resultados de un programa oficial de operaciones, basado en una eficiencia razonable. Aunque el alcance de esta eficiencia razonable es indeterminado, debe precisarse que un presupuesto no debe confundirse con un proyecto y consecuentemente no debe incluir la corrección de ciertas acciones para obtener el ahorro de desperdicios y costos excesivos. Los presupuestos van siempre ligados al tipo de empresa, a sus objetivos y a sus necesidades; El contenido y forma de los presupuestos varían de una empresa a otra por lo que es indispensable el conocimiento amplio de las empresas en que se hayan de aplicar. La preparación del presupuesto se basa en el principio de que todas las transacciones de la empresa están íntimamente relacionadas entre sí y si una determinada parte del plan pudiera ser tomada como punto de partida entonces el resto del plan podría ser establecido con un grado razonable de seguridad, permitiendo a la gerencia tomar decisiones adecuadas. La determinación del periodo presupuestal es función de varios factores, tales como la estabilidad o inestabilidad de las operaciones de la empresa, el periodo de proceso productivo, las tendencias de mercado, etc... En la práctica es aceptable estimar las operaciones de la empresa en periodos de un año, dividiendo este en trimestres y que a su vez estos se subdividirán en meses. Posteriormente, se irán elaborando estimaciones futuras por periodos mensuales, trimestrales y anuales, tomando como base de cálculo las experiencias adquiridas con anterioridad y con el propósito de establecer un análisis presupuestario continuo. Las oficinas técnicas de proyectos nacen de la necesidad de centralizar la gestión de proyectos para planificar, otorgar prioridades y atender a la calidad de los servicios prestados. La oficina técnica trata de liberar a los directivos de las empresas de tareas de gestión táctica de proyectos cada vez más complejos. La tarea fundamental de la oficina técnica es interpretar correctamente las necesidades de las áreas de negocio para verificar cómo se cubren mediante la ejecución de los proyectos.

Los objetivos de una oficina técnica de proyectos son:

1. Vigilar la adecuación entre tecnología y negocio.
2. Incrementar los niveles de servicio.
3. Verificar la aplicación de estándares y procedimientos.
4. Definir mecanismos de control y seguimiento que ayuden a tomar decisiones.
5. Controlar la calidad de los productos o servicios recibidos.
6. Facilitar la comunicación entre las áreas de negocio, el departamento de sistemas de información y los proveedores de servicio.

El buen empresario debe planificar de forma inteligente tanto sus ingresos y gastos como sus operaciones con el objetivo de obtener valor, el cual se logra de manera más eficiente si se coordinan sistemáticamente todas las actividades de la empresa. Al buen empresario le corresponde establecer un control adecuado para determinar la variabilidad de las operaciones; procurando fijar acciones correctivas para evitar que en estimaciones futuras no se hagan cálculos desproporcionados.

Los gastos que se pueden asociar al desarrollo de este proyecto son:

1. Por parte del alumno los gastos correspondientes a las horas empleadas para la consecución del Trabajo Fin de Grado. Según el Sistema Europeo de Transferencia de Créditos, por cada crédito ECTS son necesarias entre 25 y 30 horas dedicadas por el alumno para la actividad de estudio. En este proyecto el alumno ha dedicado una media de 30 horas semanales durante los meses que ha durado la elaboración de este proyecto (aproximadamente 3 meses).

$$\text{Horas empleadas por alumno: } 30 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} \times 4 \frac{\text{semanas}}{\text{mes}} \times 3 \text{ meses} = 360 \text{ horas}$$

Coste alumno / hora: 12 €/hora

2. Por parte del tutor asociado al Trabajo fin de Grado las horas empleadas en la formación para su grupo de alumnos como las horas disponibles que el tutor ha tenido que estar disponible para tutorías y consultas por parte del grupo de alumnos. Se considera el mismo número de horas que el tutor ha empleado para la atención del proyecto que las que ha dedicado el alumno porque el proyecto para los alumnos es individual pero el tutor ha estado disponible para el grupo de alumnos a los que ha formado para este proyecto.

$$\text{Horas empleadas por el tutor: } 10 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} \times 4 \frac{\text{semanas}}{\text{mes}} \times 3 \text{ meses} = 120 \text{ horas}$$

Coste tutor doctorado / hora: 50 €/hora

3. La licencia de uso profesional de la herramienta de software Abaqus CAE necesaria para el desarrollo de modelos y simulaciones del trabajo en cuestión. Esta licencia está adjudicada a la Universidad Carlos III de Madrid y tiene un coste anual de 33.650 €. Se considera el gasto trimestral del costo total de la licencia ya que esta se ha usado durante 3 meses.

$$\text{Coste Licencia Abaqus: } 13.000 \frac{\text{€}}{\text{año}} \times 0,25 \frac{\text{año}}{\text{trimestre}} = 3250 \frac{\text{€}}{\text{trimestre}}$$

Presupuesto TFG	Nº horas	Coste horario	Total
Coste del alumno	360	12	4320
Coste del tutor doctorado	120	50	6000
Coste de licencia Abaqus	NA	NA	3250
Total			13.570 €

Tabla presupuestaria para proyecto TFG

7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto está enfocado al análisis y desarrollo de un sistema de protección para el amortiguamiento de una bombilla. Desde el comienzo del desarrollo de este proyecto los esfuerzos se centraron en crear diferentes sistemas de protección a través de la herramienta de simulación Abaqus. Estos nuevos sistemas de protección creados tienen que cumplir una serie de condiciones para que la herramienta de software los admita para ser procesados y así realizar un análisis de los sistemas y poder ofrecer unos resultados cualitativos y cuantitativos. Entre esta serie de condiciones que el programa exige para realizar los análisis estaban; la formación de geometría de los airbags, la unión entre partes de los sistemas (airbags y bombilla), la creación de superficies y secciones, la elección de elementos de mallado específico para este tipo de ensayo, la aplicación de velocidad inicial. Son muchos los detalles que hay que tener bien controlados para que, en el caso de fallo de análisis, el usuario sepa que tiene que arreglar en cada caso y dónde tenga que ir en el programa para variar parámetros y conseguir que se realice el análisis.

En la siguiente tabla se muestra los mejores resultados de aceleración alcanzados para cada modelo desarrollado. Como se puede comprobar el modelo que mejor ha amortiguado el impacto del sistema ha sido el segundo modelo. Esto es debido al tamaño ligeramente superior de los airbags dispuestos en este modelo comparado con el resto de modelos y a que la disposición de caída o lanzamiento ha sido vertical. El tercer modelo que únicamente se diferenciaba del segundo en cuanto a la disposición de lanzamiento muestra como la aceleración alcanzada aumenta hasta $4,2 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$. Como ya vimos en el análisis de los modelos, si la disposición de caída era aleatoria o transversal habría una alta probabilidad que el modelo sufriera dos colisiones sucesivas. A esta segunda colisión se le añadía el efecto que por causa de la primera el sistema rotase y aumentara la velocidad del sistema. En consecuencia, la segunda colisión del lanzamiento excéntrico se produce a mayor velocidad que la inicial y por tanto el sistema sufre una aceleración mayor. Todo lo anterior sucede de la misma manera para los modelos cuarto y quinto.

	Presión interna (Pa)	ACOM 2 (m/s²)	Tensión Max (Pa)	Deformación
Modelo 1	5 E+3	9,35E+03	2,70E+07	1,22E-01
Modelo 2	10 E+3	2,59E+03	2,66E+07	4,50E-02
Modelo 3	10 E+3	4,20E+03	2,74E+07	1,28E-01
Modelo 4	50 E+3	4,95E+03	2,27E+07	8,34E-03
Modelo 5	10 E+3	6,19E+03	2,51E+07	3,85E-02

Tabla 7.1. Mejores resultados de cada modelo

Con respecto al cuarto modelo de sistema de protección para la protección de una bombilla se puede decir que se ha logrado una buena respuesta a pesar del tamaño bastante ajustado para el objetivo de este proyecto y a pesar de ser este modelo el que más problemas ha generado. Estos problemas provenían del espesor de película de membrana se estaba considerando para el comportamiento elástico de los airbags. Este modelo llegaba ofrecer resultados, pero en la simulación se podía observar como la bombilla siempre colisionaba con el suelo a pesar de aumentar la presión interna de los airbags. Realizando una prueba para analizar qué efecto tenía en uno de los modelos el variar únicamente el espesor de película de membrana y mantener todos los parámetros iguales se concluyó que a menor espesor mejor respuesta amortiguadora tenían los airbags. Como consecuencia de esta prueba, se tomó el espesor que mejor aceleración había resultado y se dispuso a introducirla como mejora en cada uno de los modelos desarrollados. La aceleración global de todos los modelos se disminuyó en un orden de magnitud al menos tras la reducción del espesor de las membranas de los airbags.

Con respecto al primer modelo desarrollado se debe decir que ha sido el más laborioso de completar ya que es el que más superficies creadas tiene y como se mencionaba anteriormente la creación de superficies externas e internas, la creación de secciones para poder asignar los materiales creados a dichas superficies y sobre todo la unión mutua de los airbags y de estos con la bombilla presentaba dificultades. De este modelo hay que destacar que las deformaciones generadas tras el impacto son las menores con respecto al resto de modelos, que la presión interna que ha dado lugar a la mínima aceleración ha sido de las más bajas y que la aceleración resultante de este modelo está dentro del orden de magnitud de los otros sistemas.

En todos los lanzamientos de simulación que se han realizado se han obtenido las tensiones equivalentes de Von Mises y las deformaciones máximas resultantes de cada análisis. Se debe indicar que en ningún caso las deformaciones han sido excesivas a lo que corresponden con unas tensiones máximas que no superan el límite elástico de los materiales empleados para la simulación de los modelos. Por ejemplo, el modelo que mayor tensión equivalente ha sufrido es el tercero con un valor de 27,4 MPa y el límite elástico del material de los airbags es de 2,7 GPa. Si se hubiese elegido un tipo de polietileno con menor límite elástico todavía los sistemas estarían seguros de no plastificar.

Al comienzo de este proyecto la dificultad se encontraba en lograr que los diferentes sistemas de protección llegasen a realizar análisis de resultados. Sobre todo, fue por motivo de uniones entre

superficies, creación de secciones para asignar velocidad al sistema, en la ruta para establecer las condiciones de ligadura de la superficie de impacto. Una vez que estas dificultades fueron superadas, se logró que el programa realizara un análisis del sistema, pero la simulación no reflejaba el impacto y rebote esperado. Este problema era debido a la ruta para establecer el Reference Point de la superficie de impacto.

A la hora de considerar las variantes de lanzamiento para los modelos tercero y quinto que únicamente se diferencian de los modelos segundo y cuarto respectivamente en que se han rotado los sistemas entre 45-90° sobre sí mismos para observar el comportamiento del impacto desde una perspectiva diferente. No fue fácil girar los modelos 90° para generar una simulación de impacto en sentido transversal ya que la herramienta específica para girar los sistemas necesita dos puntos de referencia (uno inicial y otro final) más el número de grados de rotación para realizar la acción, pero en el eje de revolución no hay puntos creados para llevar a cabo la rotación mencionada. Por motivo del error considerado al dotar a los airbags de un espesor de película de membrana excesivo, las simulaciones de los modelos daban como resultado un valor de aceleración elevado por lo que se decidió elevar la altura inicial de los sistemas para la simulación con el propósito de dar tiempo suficiente a los airbags para que se hincharan plenamente de gas y así no perder la totalidad de la capacidad amortiguadora de los mismos.

Otro de las dificultades que ha presentado el trabajo ha tenido que ver con la obtención de gráficas y resultados. Para obtener resultados de ACOM se pretendía crear un set de nodos a lo largo del contorno vertical de la bombilla para visualizar las aceleraciones correspondientes a puntos concretos del sólido rígido, pero como el programa no lo permitía y mostraba error entonces se probó a crear un set de elementos representativos del perfil de la bombilla y de esta manera el programa si permitía realizar los cálculos solicitados para el análisis de la bombilla. Una de las ventajas de crear un set de elementos representativos del objeto es que se ahorra mucho tiempo de cálculo para el programa. Posibles mejoras que pueda tener el diseño de estos sistemas de protección contra el impacto mediante airbags pueden ser; realizar el análisis de este estudio con otros materiales que tengan propiedades mecánicas similares, probar con otro gas de relleno para los airbags que presente mayor densidad, Crear otros diseños y configuraciones de los airbags o estudiar en profundidad el efecto que supone los airbags adyacentes al airbag que recibe la primera colisión

Hace no mucho tiempo Amazon anunció que se planteaba introducir un nuevo servicio de entrega de pedidos a través de drones. Estos drones pueden ser pilotados a grandes distancias de su destino

y por supuesto la misión del dron es la de transportar el paquete desde la tienda o almacén hasta el destinatario. Actualmente este servicio se está terminando de desarrollar y se pretende implantar en pocos años. Hasta ahora este servicio está diseñado para localizar el destinatario y aterrizar en una plataforma concreta. Una posible innovación para este servicio podría ser el traslado del paquete hasta la vertical de la localización correcta y soltarlo desde el aire para que cayera en las inmediaciones del destinatario. Por supuesto esta innovación incluiría la implantación de airbags de embalaje dentro del paquete que en definitiva es el objeto de análisis de este trabajo. Con esta nueva innovación, como con todo tendría sus ventajas e inconvenientes. Algunas de las ventajas podrían ser el ahorro energético de las baterías de los drones o la disminución de riesgo durante el aterrizaje y despegue del dron desde la localización de destino ya que uno de los requisitos para el cliente es que disponga de un terreno libre de obstáculos y una plataforma de aterrizaje. Amazon es el rey de la logística y del comercio electrónico, pero también de crear “hype” y expectación. Eso es lo que hizo hace ahora justo tres años, cuando anunció Prime Air, su proyecto de entregar paquetes con drones. La iniciativa parecía más bien un puro movimiento de marketing, pero la compañía no ha cesado en su empeño en convertirlo en realidad. Hoy ha anunciado un paso importante para conseguirlo: el primer envío real con un dron. Se hizo a un cliente en Reino Unido y en sólo 13 minutos de haber solicitado el producto. Se trata de un entorno de prueba, un programa piloto, pero la tecnología está lista para emplearse y parece que funciona. En el mismo momento que un cliente compra un producto, éste sale desde el centro de logística más cercano. Se carga en un dron eléctrico autónomo, pre-programado con las coordenadas de destino y guiado con tecnología GPS. Vuela siempre por debajo de los 120 metros de altitud y es capaz de llevar una carga máxima de 2,2 kg. El cliente puede vivir tanto en la ciudad como en un entorno rural, pero tiene que disponer de una plataforma de aterrizaje cuyas coordenadas de localización debe suministrar a la hora de hacer el pedido.

8 REFERENCIAS

- Anzures M. Juan, P. G. (2008). Estabilidad de Sistemas No-lineales: Sistema de Nivel de Líquidos de Dos Tanques Conectados. *RIEE&C*, 6-12.
- B2PACK. (10 de Junio de 2016). *b2pack*. Obtenido de b2pack: <http://b2pack.com/item/historia-del-packaging-1-4>
- Bollen, A. N. (1999). Comparison of methods for estimating the bruise volume of apples. *Journal of Agricultural Engineering Reserch*.
- Cano, V. (3 de Agosto de 2016). *Autobild*. Obtenido de Autobild: <https://www.autobild.es/reportajes/historia-airbag-bolsa-que-salva-vidas-296491>
- D.CADOGAN, C. S. (1999, Julio). *ScienceDirect*. Retrieved from ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576501002156>
- He Huan, C. Z. (2015, Octubre 30). *ScienceDirect*. Retrieved from ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936115002010>
- Lotta Jakobsson, T. B. (2013). *Pedestrian Airbag Technology - A Production System*. Sweden: Volvo Car Corporation.
- Marcus Budt, D. W. (7 de Marzo de 2016). *ScienceDirect*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916302641>
- Markou, G. (2014). *ReserchGate*. Retrieved from ReserchGate: https://www.researchgate.net/post/What_is_the_main_difference_between_implicit_and_explicit_analysis/amp
- Oliva, C. G. (1 de Marzo de 2018). *Autonoción*. Obtenido de Autonoción: <https://www.autonocion.com/lo-ultimo-en-seguridad-para-motoristas-ojo-al-airbag-portatil-que-puede-salvar-miles-de-vidas/>
- Serway, R. A. (1997). *Física*. México.D.F.: Mc GRAW-HILL.
- Tobi Fadiji, C. J. (19 de Junio de 2018). *ScienceDirect*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511018300035#bib145>
- Vera, D. (10 de Diciembre de 2015). *Blogspot*. Obtenido de Blogspot: <http://transferenciadecolor-veradomenica-5b.blogspot.com/2015/12/exergia-una-medida-del-potencial-de.html>
- Weakley, C. (2018, Marzo 6). *The Telegraph*. Retrieved from The Telegraph: <https://www.telegraph.co.uk/travel/ski/advice/Avalanche-airbags-Your-guide-to-these-life-savers/>

